

11. ACIDEZ DE LOS SUELOS Y SU MANEJO

11.1 INTRODUCCIÓN

La acidez de los suelos es uno de los principales retos para la agricultura en las regiones tropicales (Barcelo & Poschenrieder, 2002; Rufyikiri et al, 2004). Los suelos pueden volverse ácidos después de largos periodos de uso intensivo, como es el caso del banano y por esto es importante abordar este problema para manejarlo y lograr sostener e incrementar el rendimiento.

Los fundamentos de la acidez en el suelo son universales, pero las estrategias de manejo son específicas a cada tipo de suelo y sistema agrícola, por lo que no se debe usar una sola. Las características particulares de cada suelo son las que finalmente determinan las estrategias de control a corto, mediano y largo plazo, más efectivas.

11.2 NATURALEZA DE LA ACIDEZ DE LOS SUELOS.

Existen varios procesos en el suelo que promueven la disminución del pH. Todos estos procesos ocurren naturalmente dependiendo del tipo de suelo, del tipo de cultivo y de las condiciones de manejo.

Dentro de las principales causas de la acidificación de los suelos en los sistemas productivos agrícolas se encuentran: (1) Remoción de nutrientes por el cultivo y lavado de bases (2) la aplicación de fertilizantes nitrogenados y (3) El contenido de aluminio en el suelo y su reacción en cadena (Espinosa y Molina. 1999).

11.2.1 Remoción de nutrientes

Las arcillas, la materia orgánica y en menor medida los hidróxidos de hierro, retienen nutrientes en una forma disponible para la planta. La capacidad del suelo para retener una cierta cantidad de nutrientes (almacenamiento o capacidad de adsorción) determina la fertilidad natural de un suelo.

Los nutrientes tienen cargas positivas (+) (cationes) o cargas negativas (-) (aniones) (figura 1). De acuerdo a estas cargas los nutrientes son atraídos

por los minerales arcillosos y la materia orgánica. A mayor pH del suelo mayor cantidad de bases intercambiables harán parte del complejo de adsorción.



Figura 1. Remoción de nutrientes por las plantas en el complejo de intercambio.

El reemplazo de cationes benéficos para las plantas por H^+ en el complejo de adsorción contribuye a la acidificación del suelo y disminuye la riqueza de nutrientes disponibles. Por ejemplo, en la zona de Urabá la capacidad de retener nutrientes en el suelo es afectada por el pH y a medida que el suelo se acidifica su capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) disminuye respecto a la capacidad de intercambio catiónico medido a pH neutro (CIC).

En la figura 2 se muestra la pérdida relativa de CICE en forma exponencial a medida que el pH del suelo disminuye teniendo como referencia suelos que tiene un pH de 6, que es pH promedio de los suelos en la región de Urabá, que no han sido intervenidos con fines agrícolas o que tiene poco tiempo esta intervención (figura 2). Esto se puede dar por tres motivos:

- La absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ por las raíces de las plantas y liberación de H^+ como mecanismo que le permite mantener el equilibrio al interior de la planta.
- La pérdida de cationes a capas inferiores del suelo debido a el movimiento del agua por gravedad.
- La presencia de aniones como (NO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-) que forman pares iónicos con los cationes y de esta forma son arrastrados del perfil del suelo por el movimiento del agua.

Esta pérdida gradual de CICE, se puede reducir con un adecuado plan de fertilización que debe tener en cuenta frecuencias adecuadas de aplicación de

nutrientes para minimizar pérdidas por lixiviación y escorrentía y un adecuado balance de nutrientes y el uso de enmiendas.

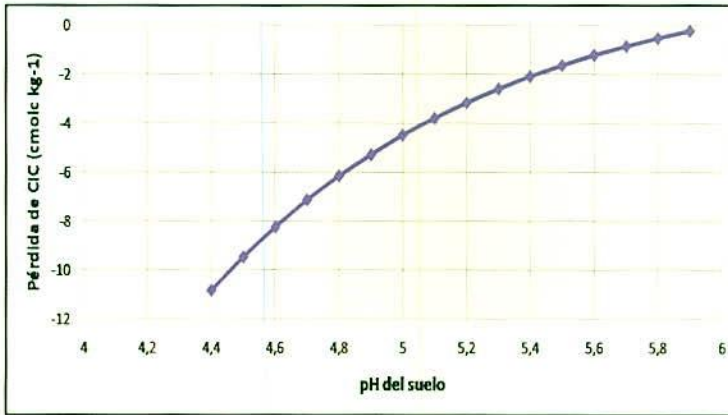


Figura 2. Curva ajustada de la pérdida de CICE relativa de los suelos en la región de Urabá relacionada con la disminución del pH del suelo (CICE de referencia en suelos con pH 6,0). Análisis basado en datos de la CICE y CIC a pH 7,0 obtenida en laboratorio.

11.2.2 Utilización de fertilizantes nitrogenados

La nitrificación de los fertilizantes que contienen amonio produce acidez en el suelo debido a la liberación de iones hidrogeno (H^+). Las diferentes reacciones de los fertilizantes nitrogenados que conllevan a la acidificación de los suelos se presentan la figura 3.

Cada mol de N proveniente del sulfato de amonio produce en teoría 4 moles de H^+ , mientras que cada mol de N proveniente de la urea o del nitrato de amonio produce solamente 2 moles de H^+ . Esto sugiere que el Sulfato de amonio es dos veces más acidificante que el Nitrato de amonio o la urea.

No obstante, a través de experimentos de invernadero se ha encontrado que la acidez generada en suelos que han recibido aplicaciones urea y el nitrato de amonio es solamente un 50% del valor teórico. Por esto, la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales basados en dicha información señala que la cantidad de cal requerida para neutralizar la acidez inducida por la urea y el Nitrato de amonio sería de 1,8 kg de carbonato de calcio ($CaCO_3$) por kg de N proveniente de estas fuentes.

Respecto al sulfato de amonio se sugiere que la acidez desarrollada por un mol de N proveniente de SA es solo el 75% del valor teórico. Por lo que es tres veces mayor que la acidez desarrollada por un mol de N proveniente del nitrato de amonio o de la urea (Chien *et al*, 2009).

De acuerdo con lo anterior sería necesario 5,4 kg de carbonato de calcio (CaCO_3) por kg de N proveniente del sulfato de amonio. No obstante, otros estudios señalan que se requiere de 1,4 a 2,3 más cal para neutralizar la acidez de sulfato de amonio frente al Nitrato de amonio y la urea o sea entre 2,52 a 4,14 kg de carbonato de calcio (CaCO_3) por kg de N proveniente del sulfato de amonio (Chien et al, 2009).

Todas las fuentes nitrogenadas tienen un efecto menor sobre el pH en suelos arcillosos en comparación a los suelos arenoso y franco-arcilloso (Chien et al, 2009)

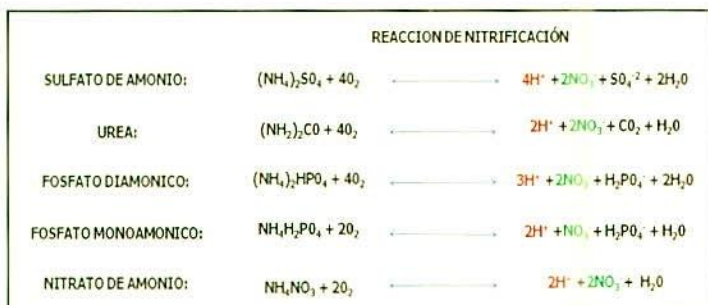


Figura 3. Reacción de nitrificación en el suelo de los fertilizantes nitrogenados

11.2.3 Aluminio intercambiable

La acidez favorece la presencia de aluminio intercambiable en el suelo y este a su vez favorece el desarrollo de la acidez en el suelo. Por esto la presencia de aluminio genera una reacción en cadena acidificando más los suelos (Espinosa & Molina, 1999).

Esto se da porque los iones de aluminio (Al^{3+}) desplazados de los minerales arcillosos, se hidrolizan para formar complejos monoméricos y poliméricos hidrox-aluminicos, cada una de estas reacciones libera H^+ y contribuyen a la acidez del suelo. Este incremento de la acidez promueve la presencia de más Al^{3+} e incrementando su disponibilidad para plantas (figura 4).

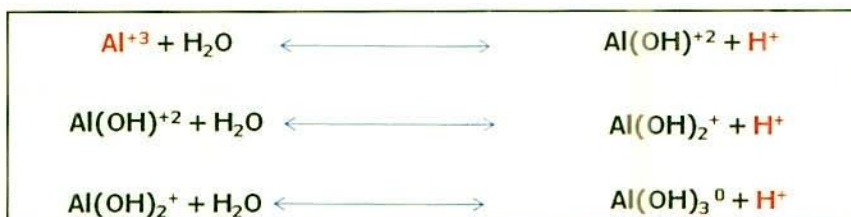


Figura 4. Reacciones del aluminio en el suelo que producen mayor acidificación.

En la figura 5 se presenta la relación entre el pH del suelo y el aluminio intercambiable en los suelos de Urabá.

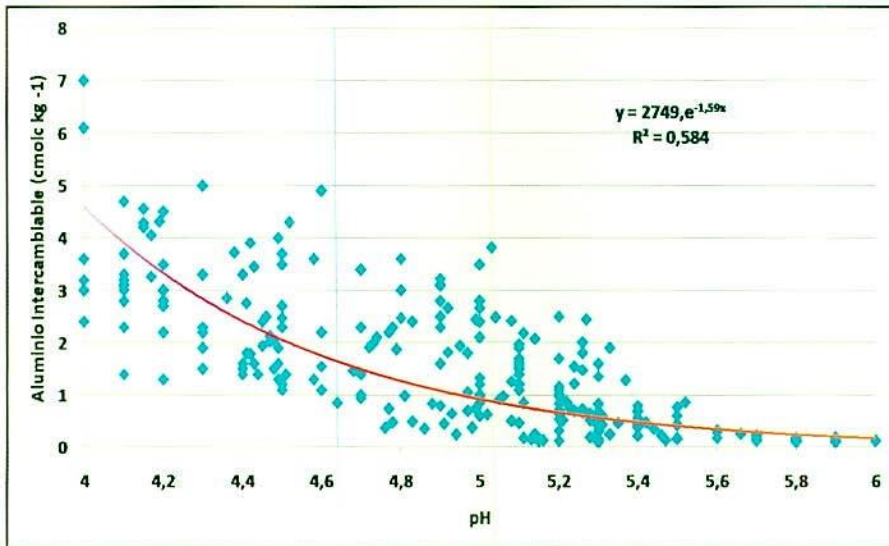


Figura 5. Relación entre aluminio intercambiable y el pH del suelo en un sistema productivo de la zona Sur eje bananero del Urabá Colombia. Fuente CENIBANANO 2011.

11.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS SEGÚN SU pH.

11.3.1 Suelos minerales con pH < 4.5

En este grupo de suelos predominan las formas de aluminio intercambiable del Al^{3+} ; también en éste es apreciable el contenido y solubilidad de iones como H_3O^+ y de Mn^{2+} , por lo cual tienen altas probabilidades de que se presenten toxicidades con ellos (Jaramillo, 2002).

Los procesos de transformación de amoníaco a nitrato son muy lentos, pudiendo causar deficiencias de nitrógeno en plantas que no sean hábiles en la utilización del amonio. Los contenidos de bases intercambiables y de molibdeno son muy bajos, en tanto que los de los demás elementos menores pueden ser bajos.

La disponibilidad de fósforo puede ser muy baja en estos suelos debido a que frecuentemente hay una alta fijación de este elemento que lo lleva a formar compuestos completamente insolubles.

11.3.2 Suelos minerales con pH entre 4.5 y 5.5

En estos suelos actúan las formas de aluminio intercambiable $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y Al^{3+} ; en este rango de pH no es significativo el contenido de H_3O^+ y los demás problemas expuestos para los suelos del grupo anterior también se presentan en este grupo, aunque con menor intensidad (Jaramillo, 2002).

11.3.3 Suelos minerales con pH entre 5.5 y 6.5

En este grupo de suelos ya no hay ningún contenido de acidez intercambiable por lo que desaparece la posibilidad de toxicidad con Al^{3+} , H_3O^+ o Mn^{2+} . Hay una mejora en la actividad biológica bacteriana; el suministro de bases, de molibdeno y de fósforo (Jaramillo, 2002).

11.4 ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS BANANEROS

La acidificación de los suelos va a limitar la producción bananera en el tiempo, si no se toman medidas correctivas. El pH y la concentración de aluminio intercambiable en suelos bananeros es variable espacialmente a pequeña escala como se observa en las figuras 6 y 7 (Gutiérrez y Castañeda, 2009) lo que puede ayudar a explicar en parte la alta variabilidad en el desarrollo y rendimientos dentro de un mismo lote de cultivo. Además, se ha encontrado a través de los años de explotación bananera en suelos de la región de Urabá un aumento en los porcentajes de saturación de aluminio (figura 8).

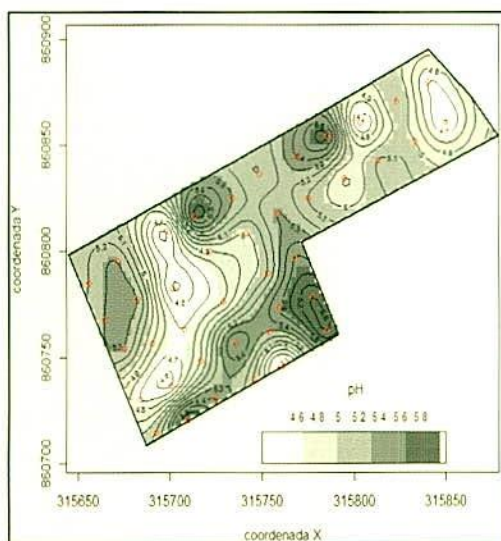


Figura 6. Variabilidad del pH dentro de un lote bananero (Gutiérrez y Castañeda, 2009).

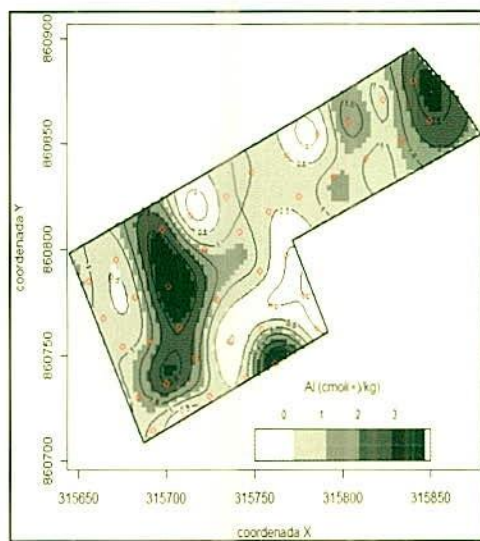


Figura 7. Variabilidad del contenido de aluminio en un suelo bananero (Gutiérrez y Castañeda, 2009).

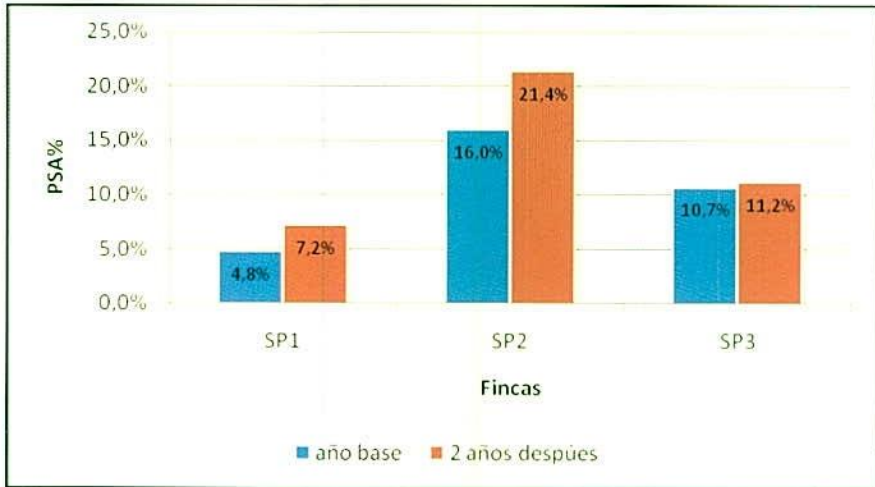


Figura 8. Variación del porcentaje de saturación de aluminio en diferentes sistemas productivos a través de dos años. SP: Sistema productivo.

11.4.1 Efectos del aluminio en la plantas

La limitante más importante de la acidificación de los suelos es el incremento de la disponibilidad de aluminio para las plantas.

El aluminio es tóxico para las plantas, interfiriendo con estructura y función del citoesqueleto, interrumpiendo la homeostasis del calcio, interfiriendo con el metabolismo del fósforo, y causando estrés oxidativo (Barcelo & Poschenrieder, 2002; Corrales *et al*, 2008; Poschenrieder *et al*, 2008, Rufyikiri *et al*, 2004).

A corto plazo se observa que la elongación de la raíz se inhibe y a largo plazo el aumento del aluminio en la solución del suelo reduce la biomasa de las raíces finas y en general del sistema radical, por lo cual la planta reduce el volumen de suelo que puede explorar, disminuyendo de este modo la absorción de nutrientes, de agua y reduciendo la producción de materia seca total y puede haber caída de plantas por pérdida de anclaje.

Un síntoma en algunas especies es que las raíces son usualmente gruesas en los ápices y pueden tornarse de color café (Poschenrieder *et al* 2008; Corrales *et al*, 2008; Barcelo & Poschenrieder, 2002). La zona de transición de la raíz que está localizada entre la zona de división celular activa y la de elongación, es la más sensible a la toxicidad por aluminio (Poschenrieder *et al*, 2008). Además, el metabolismo nitrogenado es afectado por la presencia de Al, reduciendo principalmente la actividad de la nitrato reductasa y ocurre una disminución en la absorción de NO_3^- .

En banano se ha encontrado que el aluminio se acumula en las raíces y su translocación a la parte aérea es limitada. El aluminio se fija fuertemente a los sitios de intercambio de la raíz. La absorción de aluminio por las raíces del banano reduce significativamente la tasa de transpiración de las planta, reduce la absorción de calcio y magnesio pero particularmente magnesio, los cuales son transferidos a la planta por flujo de masa. La toxicidad por aluminio reduce la materia seca, detiene el crecimiento radical e induce deficiencia de magnesio (Rufyikiri *et al* 2002).

11.4.2 Biodisponibilidad de aluminio en el suelo

La forma más fitotóxica del aluminio es el Al^{3+} , esta predomina en la solución del suelo por debajo de pH 4,5. Posiblemente el $AlOH^{2+}$ y $Al(OH)_2^+$ son también fitotóxicos, estas especies de aluminio están interrelacionadas con la variabilidad del pH. En contraste, Al-F, Al-SO₄ y Al-P, son menos o no tóxicas para las plantas (Feng *et al*, 2001).

La hidrólisis del Al^{3+} es la causante de producir grandes cantidades de H_3O^+ , siendo la presencia de este ion igual de negativa para el crecimiento normal de las raíces para las cuales es tóxico. Además es claro que el Al^{3+} no se presenta por encima de pH de 5,5 y es por debajo de este valor que los valores de Al y H aumentan exponencialmente, como se observa en la figura 9 por grupos de fincas en la región de Urabá.

La adsorción de nutrientes como Ca^{2+} y Mg^{2+} puede ser afectada por la disponibilidad de aluminio en la solución del suelo, pero es más seriamente afectada la adsorción del Mg (Rufyikiri *et al* 2002).

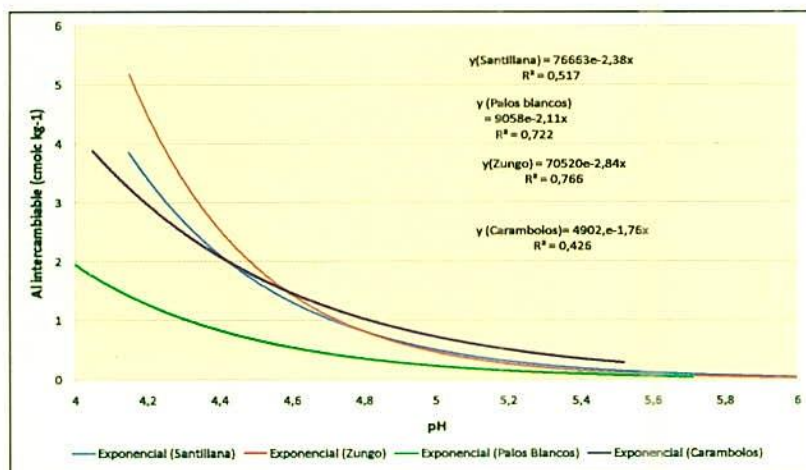


Figura 9. Incremento del aluminio con la disminución del pH en diferentes sectores del eje bananero de Urabá Colombia.

11.5 CONTROL DE LA ACIDEZ

No es necesario pensar para el manejo de los problemas derivados de la acidez con el incremento del pH, sí no neutralizar y precipitar el aluminio para eliminar su efecto tóxico sobre las plantas. Una estrategia es a través del encalado. Por otro lado, existen cultivos tolerantes al aluminio que pueden crecer y producir satisfactoriamente a moderadas tasas de saturación del aluminio en la fase del intercambio.

En el caso del banano la experiencia señala que este porcentaje de saturación de aluminio no debe superar el 10% y dentro del rango de 5% a 10% se deben iniciar las medidas de manejo de la acidez. Este porcentaje de saturación debe calcularse con base en la CIC a pH neutro y no como comúnmente y erróneamente se hace con base en la CICE.

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 o magnesio. Debido a su diferente naturaleza química, estos materiales presentan una variable capacidad de neutralización (Espinosa & Molina, 1999). El uso apropiado de la cal agrícola es uno de los factores más importantes en la producción exitosa de cultivos.

Las necesidades de cal agrícola están influenciadas por varios factores (Lazcano-Ferrat, 2003; Espinosa & Molina, 1999):

El pH del suelo: determina el grado de actividad ácida [H^+] o alcalina [OH^-] del suelo. Indica el nivel de acidez del suelo en el cual la raíz de la planta se desarrollará. Como único parámetro, el pH no es un buen indicador de las necesidades de cal agrícola.

La capacidad tampón: o capacidad a la resistencia al cambio. Es una medida de la resistencia del suelo a los cambios de pH. Indica la cantidad de cal agrícola que se requerirá para ajustar el pH a un nivel deseado y depende de la textura, CIC, materia orgánica y origen del suelo

El tipo de cultivo: determina el nivel saturación de aluminio que es capaz de soportar el cultivo.

La cantidad de aluminio: En suelos ácidos, la cantidad de aluminio (Al) se incrementa en la solución del suelo. La cantidad de cal aplicada debe ser la suficiente para disminuir la cantidad de Al soluble a niveles no tóxicos para el cultivo. Este principio se debe aplicar a otros elementos minerales como lo son el Manganeseo (Mn) y el Hierro (Fe).

11.5.1 Aspectos a tener en cuenta sobre la enmienda a aplicar

- **Equivalente químico de carbonato de calcio (ECC)**

Es una expresión de la capacidad de neutralizar la acidez de una material encalante. El carbonato de calcio puro es usado como el estándar con un valor de neutralización de 100%. El ECC que se presenta en las tablas se obtiene basado en 100% de pureza del material.

Algunas cales agrícolas, pueden tener valores superiores al 100 %. La tabla 1 presenta algunos de los materiales más comunes de encalado con sus respectivos valores de ECC o valores de neutralización. La cal agrícola contiene generalmente impurezas como grava o arena o materia orgánica que reducen el valor de ECC.

Tabla 1. Equivalentes químicos y composición química de materiales de encalado puros

Material de encalado	Equivalentes de carbono de calcio, % (CCE)	Formula	Contenido de Ca (%)	Contenido de Mg(%)
Carbonato de calcio (CaCO ₃) puro	100	CaCO ₃	40	
Piedra caliza calcítica	85 a 100			
Piedra caliza dolomítica	95 a 108	CaCO ₃ *MgCaCO ₃	21,6	13,1
Hidróxido de calcio (cal hidratada)	120 a 135	Ca(OH) ₂	54	
Oxido de calcio (cal viva)	150 a 175	CaO	71	
Silicato de calcio	88	CaSiO ₃	34,4	
Hidróxido de magnesio	172			41
Carbonato de magnesio	119			28,5
Oxido de Magnesio	248	MgO		60
Silicato de Calcio	86	CaSiO ₃	34,4	
Silicato de Magnesio	100	MgSiO ₃	34,4	24

- **Tamaño de partícula y eficiencia granulométrica**

La cal agrícola de alta calidad debe contener una distribución de tamaño de partícula que le permita reaccionar con la acidez del suelo en un periodo de uno a cuatro años. La fineza de la cal es expresada generalmente como el porcentaje del material que pasa a través de una malla específica. Las partículas que pasan a través de una malla de 100 mesh son consideradas como muy finas, mientras que aquellas que no pasan a través de 20 mesh son consideradas muy gruesas.

A medida que se reduce el tamaño de la partícula de cualquier material de encalado se aumenta el área o superficie de contacto. Entre más superficie específica tenga el material, más rápido reacciona la cal en el suelo. La cal no es soluble en agua, entonces las partículas deben ser finas para poder reaccionar en el suelo en un periodo razonable de tiempo.

Se han reportado respuestas del encalado en seis meses con materiales que pasan un tamiz de 0,25 mm (60 mesh). Los materiales en el rango de 0,338 mm (44 mesh) a 0,22 mm tiene sus máximas reacciones en 12 meses, partículas más gruesas que 0,338 mm toman 18 meses, y partículas más gruesa de 2 mm (10 mesh) tiene poco valor para corregir la acidez.

Otros estudios muestran que partículas entre 2,0 (10 mesh) a 0,85-mm (20 mesh) son solamente 14% de efectivas en comparación con partículas de 0,15 mm (100 mesh) (Haby & Leonard, 2002). En la tabla 2 se muestra la eficiencia relativa de la cal de acuerdo con la finura de molienda.

Tabla 2. Disponibilidad de cal agrícola de acuerdo con su grado de finura.

Tamaño de partícula (mm)	Número de malla (mesh)	Eficiencia relativa (%)
>2,36	<8	0
2,36 - 0,85	8 - 20	20
0,85 - 0,25	20 - 60	60
<0,25	>60	100

- **Poder relativo de neutralización total-PRNT**

La eficiencia de un material de encalado para la neutralización de la acidez está basada en sus características químicas y físicas. El PRNT indica que porcentaje de cal es capaz de reaccionar en un lapso no mayor a un año.

El valor de neutralización efectivo es una sencilla clasificación numérica que ha sido calculada para indicar la eficiencia de una material de encalado. No obstante, en Colombia esta información es poco conocida para los materiales de encalado que se encuentra en el mercado. El poder relativo de neutralización total se obtiene multiplicando la eficiencia granulométrica de un material encalante por el equivalente químico de carbonato de calcio.

La eficiencia granulométrica se obtiene de la siguiente manera: De una muestra conocida de cal, que se pasa a través de una secuencia de mallas, se obtiene la cantidad retenida entre cada una y se calcula el porcentaje.

Cada porcentaje se multiplica por eficiencia relativa (tabla 3) y se suma al final para obtener la eficiencia granulométrica del material analizado. En la tabla 3 se presenta un ejemplo con dos materiales encalantes.

Tabla 3. Calculo de eficiencia granulométrica de materiales de encalado.

Material 1				Material 2			
Tamaño de partícula (mm)	Eficiencia relativa (%)	Cantidad de material retenido cada malla (%)	Eficiencia	Tamaño de partícula (mm)	Eficiencia relativa (%)	Cantidad de material retenido cada malla (%)	Eficiencia
>2,36	0	5,6	0	>2,36	0	0	0
2,36-0,85	20	28,1	5,62	2,36-0,85	20	0	0
0,85 - 0,25	60	26,2	15,72	0,85 - 0,25	60	50	30
<0,25	100	40,1	40,1	<0,25	100	50	50
Eficiencia granulométrica del material 1			61,44	Eficiencia granulométrica del material 2			80

El valor obtenido para cada material se multiplica por su equivalente químico de carbonato de calcio. Entre mayor el valor de neutralización del material es más efectivo.

11.5.2 Reacciones de la cal en el suelo

El encalado permite la neutralización de los iones H^+ en la solución del suelo por medio de los iones OH^- que se producen al entrar la cal en contacto con el agua del suelo (Zapata, 2004; Espinosa & Molina, 1999).

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. Los materiales a bases de carbonatos neutralizan la acidez a través de la hidrólisis de los iones CO_3^{2-} y SiO_3^{2-} , que son bases débiles. Los óxidos e hidróxidos aun cuando más efectivos son difíciles de manejar y por esta razón los carbonatos son los materiales de encalado de uso en la agricultura (Espinosa & Molina, 1999).

Las reacciones básicas de la cal en el suelo ilustradas en el caso del carbonato de calcio se presentan a continuación (Figura 10):

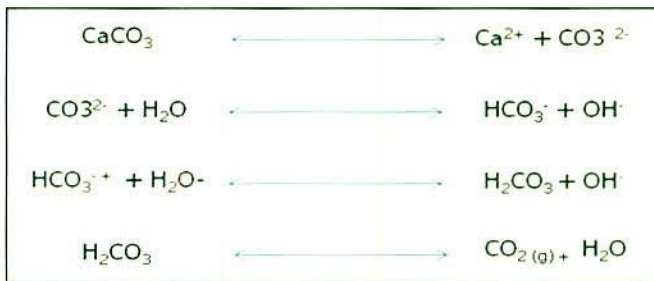


Figura 10. Reacciones de la cal en el suelo.

Los OH^- producidos en la reacción de la cal en el suelo húmedo reaccionan con los H^+ producidos en los diferentes procesos que acidifican el suelo produciendo agua y el ion calcio proveniente de la disolución del $CaCO_3$ no interviene en las reacciones de incremento del pH.

De igual forma el ion carbonato es el que realmente eleva el pH al hidrolizarse y producir iones OH^- . Además es importante indicar que el ion CO_3^{2-} se disipa como CO_2 después de las reacciones de hidrólisis. Esta es la razón por la cual la cal se limita al lugar de aplicación y se aplica superficialmente 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_2 en el sitio de aplicación (Espinosa & Molina, 1999).

El encalado permite la precipitación del Al^{3+} como $Al(OH)_3$ que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al^{3+} en las plantas y la principal fuente de iones H^+ . De igual forma las aplicaciones de cal también precipitan el manganeso y el hierro que en ocasiones se encuentran en exceso en suelos ácidos.

11.6 DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE CAL A APLICAR EN EL CULTIVO

Para determinar las necesidades de cal se deben conocer cuatro factores:

1. Tolerancia de la planta a la acidez
2. Contenido de acidez del suelo
3. Calidad del producto encalante
4. Aspectos de manejo del producto a aplicar

Las experiencias en el tema de encalado han conducido a que lo más importante es tener una buena saturación de bases para un rendimiento óptimo o dicho de otra forma lo que se busca es reducir el porcentaje de saturación de aluminio a un nivel que pueda ser tolerado por el cultivo antes de encalar para neutralizar todo el aluminio intercambiable.

En suelos tropicales hay diferentes métodos para definir la cantidad de cal a aplicar, presentamos a continuación las fórmulas de varios métodos.

11.6.1 Método de Cochrane, Salinas Y Sánchez (1980)

$$CaCO_3_{(TM/HA)} = \frac{1,8 (Al - PSAI) (CICE)}{100}$$

- **Al:** Porcentaje de saturación de Aluminio existente en el suelo, se calcula con el análisis de suelos.
- **PSAI:** Porcentaje de saturación de Aluminio deseado. Para el caso del banano el manejo debe iniciarse con un 5% de saturación de aluminio.
- **CICE:** Capacidad de intercambio catiónico efectiva
- **1,8:** Es una constante que pretende cubrir los factores que limitan la eficiencia de la reacción química de la cal en el suelo.

11.6.2 Método de Van Raij

$$CaCO_3_{(TM/HA)} = \frac{(V1 - V2) (CIC)}{100} * F$$

- **V1:** porcentaje de saturación de bases deseado
- **V2:** Porcentaje de saturación de bases que presenta el suelo
- **CIC:** Capacidad de intercambio catiónico a pH 7
- **F:** 100/ PRNT
- **PRNT:** Poder relativo de neutralización total: Este parámetro se obtiene

multiplicando la eficiencia granulométrica por el equivalente químico y este producto se divide por 100. Por ejemplo un material encalante un EQ de 90% y una eficiencia granulométrica (EG) del 80% tendrá un PRNT de 72%

11.6.3 Método combinado

El método combinado aprovecha los criterios prácticos de los dos anteriores. Se expresa en términos de porcentaje de saturación de acidez y se incluye el factor f de calidad del material encalante.

$$CaCO_3 (TM/HA) = \frac{1,5 (AI - PSAl) (CICE)}{100} * F$$

- **AI:** Porcentaje de saturación de aluminio actual
- **PRS:** Porcentaje de saturación de aluminio deseado 1,5: Es una constante que pretende cubrir los factores que limitan la eficiencia de la reacción química de la cal en el suelo, la contante es menor porque con este método hay menos factores de eficiencia sin contemplar.
- **F:** Factor de calidad del material encalante.

11.6.4 Método de neutralización del aluminio y suplemento de calcio y magnesio

Este método combina la neutralización del aluminio en el suelo con el incremento de la saturación de Magnesio y Calcio en el suelo (Vieira Soares et al, 2002).

$$CaCO_3(TM/HA) = Y \times (AI_2 - AI_1) + \left(\sum_2 Ca^{2+} + Mg^{2+} \right) - \left(\sum_1 Ca^{2+} + Mg^{2+} \right) \times F$$

Y: Es un factor de capacidad buffer del suelo definido de acuerdo con la textura del suelo, algunos rangos propuestos son los siguientes.

Suelo	% Arcilla	Y
Arenoso	0 a 15	0 a 1
Franco	15 a 35	1 a 2
Arcilloso	35 a 60	2 a 3

- **Al 2:** Contenido de aluminio en el análisis de suelos
- **Al 1** Contenido de Aluminio máximo permitido.
- **Σ2:** Suma de Ca y Magnesio deseado
- **Σ1:** Suma de Ca y Magnesio intercambiable del análisis de suelos
- **F:** Factor de calidad del material encalante.

Este método puede sobre estimar las necesidades de cal por esto es mejor descomponer la formula y utilizar una de las siguientes formulas para el cálculo de los requerimientos de cal.

$$CaCO_3(TM/HA) = Y \times (Al2 - Al1) \times F$$

$$CaCO_3(TM/HA) = \left(\sum_2 Ca^{2+} + Mg^{2+} \right) - \left(\sum_1 Ca^{2+} + Mg^{2+} \right) \times F$$

11.6.5 Ajuste final de la recomendación de cal a aplicar en el cultivo del banano

En el cultivo del banano una vez se calcula los requerimientos de cal para toda la hectárea, con las formulas y criterios expuestos anteriormente, se procede a realizar un ajuste, ya que solo un 25% del volumen del suelo alrededor de una unidad productiva de banano los impactamos con el encalado cuando esta se incorpora (figura 11). Por esto, la cantidad aplicar de cal es aproximadamente un 25% de lo calculado con las formulas anteriores en suelos con densidad de 1 g/cm³, en suelos con densidad de 1,2 g/cm³ que es los más típico en la zona bananera del Urabá es un 30% y en suelos con densidad aparente de 1,4 g/cm³ es un 35%.



Figura 11. Volumen de suelo impactado por el encalado durante una generación en el cultivo del banano.

BIBLIOGRAFIA

- Barcelo, J. y C. Poschenrieder. 2002. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. En: *Environmental and Experimental Botany*. Vol. 48, no. 1, p. 75–92.
- Corrales, I., Ch. Poschenrieder y J. Barcelo. 2008. Boron-induced amelioration of aluminium toxicity in a monocot and a dicot species. En: *Journal of Plant Physiology*. Vol. 165, no. 5, p. 504—513.
- Chien, S. H., M. M. Gearhart y D. J. Collamer. 2009. Acidez generada por los fertilizantes nitrogenados: nueva evaluación de los requerimientos de cal. En: *Informaciones Agronómicas*. No. 41, p. 16-17.
- Espinosa, J. y E. Molina. 1999. Acidez y encalado de los suelos. INPOFOS. 42 p.
- Gutiérrez H., J.C. y D. Castañeda S. 2009. Metodología para el manejo y uso del suelo por sitio específico en el cultivo de banano. Medellín: Asociación de Bananeros de Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Universidad del Magdalena. 78 p.
- Haby, V. A y A. T. Leonard. 2002. Limestone quality and effectiveness for neutralizing soil acidity. En: *Communications in Soil Science and Plant Analysis* Vol. 33, no. 15-18, p. 2935-2948.
- Jaramillo J., D. F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. 613 p.
- Lazcano Ferrat, I. 2003. Cal agrícola: conceptos básicos. INPOFOS. 3 p. Disponible en internet. www.ipni.net/ppiweb/iamex.
- Ma, J. F., P. Ryan. and E. Delhaize. 2001. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. En: *Trends in Plant Science*. Vol. 6, no. 6, p. 273-278.
- Poschenrieder Ch., et al. 2008. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. En: *Science of the Total Environment*. Vol. 400, nos. 1-3, p. 356–368.
- Rufyikiri, G., et al. 2002. Cation exchange capacity and aluminum–calcium–magnesium binding in roots of bananas cultivated in soils and in nutrient solutions. En: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol. 33, nos. 5-6, p. 991-1009.

- Rufyikiri, G., et al. 2004. Mobilization of aluminium and magnesium by roots of banana (*Musa spp.*) from kaolinite and smectite clay minerals. En: *Applied Geochemistry*. Vol. 19, no. 4, p. 633–643
- Soares, A H. V., C. A. Silva y A. L Zambalde. 2004. *Ceressefs: um sistema especialista para o cálculo da necessidade de calagem e recomendação de corretivo*. Brasil: Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência da Computação. 7 p.
- Zapata, R. 2004. *La química de la acidez del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 207 p.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	1	
1. ETAPAS DEL CRECIMIENTO DE LA PLANTA DE BANANO		
1.1	INTRODUCCIÓN	3
1.2	ETAPAS Y FASES EN PLANTAS: CONCEPTOS	3
1.3	ETAPAS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL BANANO	4
1.3.1	Etapa Vegetativa	5
1.3.2	Etapa Reproductiva (Etapa vegetativa aparente)	8
1.3.3	Etapa Productiva	11
	BIBLIOGRAFIA	13
2. CRECIMIENTO Y DESARROLLO EN BANANO		
2.1	INTRODUCCION	15
2.1	GENERALIDADES	15
2.3	DESARROLLO DE SISTEMA DE ÓRGANOS EN BANANO	16
2.3.1	Sistema Radical	16
2.3.2	Sistema Foliar	19
2.3.3	Sistema de Soporte y Conducción	21
2.3.4	Desarrollo de los Hijos	26
2.4	ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA EN PLANTAS DE BANANO	27
	BIBLIOGRAFIA	30
3. DURACIÓN DE FASES Y ETAPAS FENOLÓGICA Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA		
3.1	INTRODUCCIÓN	33
3.2	DISTRIBUCIÓN DE LA FLORACIÓN	33
3.3	DURACIÓN DE LAS ETAPAS FENOLÓGICAS Y SU RELACIÓN CON FACTORES AMBIENTALES	36
3.3.1	Temperatura	36

3.3.2	Insolación: Cantidad, calidad y duración	38
3.3.3	Régimen de lluvias y estrés hídrico	44
3.3.4	Vientos	46
	BIBLIOGRAFIA	47

4. TRANSLOCACIÓN, DISTRIBUCIÓN, ASIMILACIÓN Y FUNCIONES DE LOS NUTRIENTES

4.1	INTRODUCCIÓN	49
4.2	ACCESO DE LAS PLANTAS A LOS NUTRIENTES DEL SUELO	49
4.2.1	Interceptación radical	49
4.2.2	Movimiento de nutrientes del suelo hasta la superficie de la raíz	50
4.2.3	Disponibilidad de nutrientes en la rizosfera	51
4.3	MECANISMOS DEL TRANSPORTE NUTRIENTES EN LAS PLANTAS	51
4.3.1	Transporte de iones en la raíz	52
4.3.2	Transporte a corta distancia de moléculas e iones	53
4.3.3	Movimiento de nutrientes a larga distancia	53
4.4	CONSIDERACIONES DEL TRANSPORTE DE NUTRIENTES EN LAS PLANTAS	55
4.4.1	Generalidades	55
4.4.2	Toma de nutrientes en plantas de banano	58
4.5	DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES EN PLANTAS DE BANANO	59
4.5.1	Distribución del nitrógeno	59
4.5.2	Distribución del fósforo	60
4.5.3	Distribución del potasio	61
4.5.3	Distribución del calcio	61
4.5.5	Distribución del magnesio	62
4.6	FUNCIONES DE LOS NUTRIENTES	63
4.6.1	Nitrógeno	63
4.6.2	Fósforo	63
4.6.3	Potasio	65
4.6.4	Calcio	65
4.6.5	Magnesio	66

4.6.6	Azufre	67
	BIBLIOGRAFIA	69

5. ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA NUTRICION BALANCEADA DEL CULTIVO DEL BANANO

5.1	INTRODUCCIÓN	73
5.2	VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN SISTEMAS PRODUCTIVOS BANANEROS	74
5.2.1	Caracterización de la variabilidad	74
5.2.2	Manejo de la variabilidad o manejo por sitio específico	78
5.3	INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS	80
5.3.1	Consideraciones generales en la interpretación del análisis	80
5.3.2	Aproximación al contenido de nutrientes en la región de Urabá	81
5.4	INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE TEJIDO FOLIAR	82
5.5	EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES	85
5.6	OPORTUNIDAD Y FRECUENCIA DE LA APLICACIÓN	88
5.7	BALANCE DE NUTRIENTES	91
5.7.1	Ensayos de dosis Respuesta	91
5.7.2	Consideraciones sobre la interacción entre nutrientes a tener en cuenta para mejorar la eficiencia de la fertilización	94
	BIBLIOGRAFIA	97

6. RENDIMIENTO EN BANANO Y DETERMINACIÓN DE SUS COMPONENTES

6.1	INTRODUCCIÓN	101
6.2	DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES EN BANANO	103
6.2.1	Determinación del número de racimos	103
2.	Peso aprovechable de la fruta	110
6.3	MANEJOS POBLACIONALES PARA MEJORAR ÍNDICES DE COSECHA O PARA PROGRAMAR COSECHAS	112
6.3.1	Renovación generalizada de un área de cultivo	112

6.3.2	La poda generalizada de un área de cultivo	114
6.3.3	Poda selectivas de plantas dentro de la población	114
6.3.4	Desbacote	116
6.5	EL RENDIMIENTO: ANÁLISIS INTEGRAL DE SUS COMPONENTES	116
	BIBLIOGRAFIA	118

7. DINÁMICA DE LOS ELEMENTOS EN EL SUELO

7.1	INTRODUCCIÓN	119
7.2	INTERCAMBIO IÓNICO	119
7.2.1	Tipos de carga negativa que aportan los coloides del suelo	120
7.2.2	Propiedades iónicas relacionadas con la adsorción	122
7.2.3	Mecanismos del intercambio iónico	126
7.3	DINÁMICA DE NUTRIENTES EN EL SUELO	128
7.3.1	Nitrógeno	130
7.3.2	Fósforo	134
7.3.3	Potasio	135
7.3.4	Calcio	136
7.3.5	Magnesio	137
7.3.6	Azufre	137
7.4	ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LA REGIÓN DE URABÁ RELACIONADAS CON LA DINÁMICA DE NUTRIENTES EN EL SUELO	138
	BIBLIOGRAFIA	142

8. BORO Y ZINC

8.1	INTRODUCCIÓN	147
8.2	BORO	147
8.2.1	Boro en el Suelo	147
8.2.2	Boro en la planta	149
8.3	ZINC	152
8.3.1	Zinc en suelo:	152
8.3.2	Zinc en la planta	153

8.4	FUENTES DE FERTILIZANTES PARA LA NUTRICIÓN CON MENORES	157
8.4.1	Fuentes de Boro	157
8.4.2	Fuentes de Zinc	158
8.4.3	Estrategias para la aplicación de micronutrientes	160
8.5	NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN CON ZINC Y BORO EN BANANO	163
8.5.1	Fertilización edáfica con boro y zinc	163
8.5.2	Fertilización foliar	166
	BIBLIOGRAFIA	167

9. DESORDENES FISIOLÓGICOS EN LA PLANTA DE BANANO DURANTE LAS ETAPAS CRÍTICAS DE DESARROLLO DE LA INFLORESCENCIA, FLORES Y FRUTOS

9.1	INTRODUCCIÓN	171
9.2	DESORDENES FISIOLÓGICOS	172
9.2.1	Durante el Desarrollo de la Inflorescencia	172
9.2.2	Durante el Desarrollo de la Flor	173
9.2.3	Durante el Desarrollo del Fruto	174
9.3	DESORDEN FISIOLÓGICO: MANCHA DE MADUREZ	174
9.3.1	Generalidades	174
9.3.2	Factores asociados con mancha de madurez en banano	176
9.3.3	Periodos y fases críticas relacionados con el desorden	177
9.3.4	Disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo	179
9.3.5	Movilidad de nutrientes en la planta	182
9.3.6	Manejo agronómico para reducir el impacto de mancha de madurez	182
	BIBLIOGRAFIA	186

10. EFECTO DEL EXCESO DE AGUA EN LA FISIOLÓGÍA DEL BANANO Y EN EL SUELO

10.1	INTRODUCCIÓN	187
10.2	GENERALIDADES	188

10.3	EFFECTOS EN LA PLANTA	189
10.3.1	Afecta la fotosíntesis	189
10.2.2	Afecta el crecimiento radical	190
10.2.3	Incremento de la producción de especies reactivas de oxígeno.	191
10.2.4	Disminución de la toma y absorción de nutrientes	191
10.2.5	Deficiencia de Boro y zinc y aumento de radicales libres	192
10.2.6	Aumento de la absorción de nutrientes que pueden causar toxicidad	193
10.2.7	Desbalance entre fitoreguladores	194
10.3	EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO	196
10.3.1	Desnitrificación	198
10.3.2	Aumento de la biodisponibilidad de manganeso	198
10.3.3	Aumento de la biodisponibilidad de hierro	198
10.3.4.	Deterioro en la red de drenaje	199
10.3.5	Arrastre de materiales a los lotes	199
10.4	MANEJO AGRONÓMICO PARA REDUCIR EL IMPACTO DEL EXCESO DE AGUA	200
10.4.1	Prácticas preventivas	200
10.4.2	Prácticas de respuesta en épocas de saturación de agua	205
10.4.3	Prácticas de recuperación una vez cese la presión de las lluvias	206
	BIBLIOGRAFIA	209

11. ACIDEZ DE LOS SUELOS Y SU MANEJO

11.1	INTRODUCCIÓN	211
11.2	NATURALEZA DE LA ACIDEZ DE LOS SUELOS	211
11.2.1	Remoción de nutrientes	211
11.2.2	Utilización de fertilizantes nitrogenados	213
11.2.3	Aluminio intercambiable	214
11.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS SEGÚN SU pH	215
11.3.1	Suelos minerales con pH < 4.5	215
11.3.2	Suelos minerales con pH entre 4.5 y 5.5	216

11.3.3	Suelos minerales con pH entre 5.5 y 6.5	216
11.4	ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS BANANEROS	216
11.4.1	Efectos del aluminio en la plantas	217
11.4.2	Biodisponibilidad de aluminio en el suelo	218
11.5	CONTROL DE LA ACIDEZ	219
11.5.1	Aspectos a tener en cuenta sobre la enmienda a aplicar	220
11.5.2	Reacciones de la cal en el suelo	223
11.6	DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE CAL A APLICAR EN EL CULTIVO	224
11.6.1	Método de Cochrane, Salinas Y Sánchez (1980)	224
11.6.2	Método de Van Raij	224
11.6.3	Método combinado	225
11.6.4	Método de neutralización del aluminio y suplemento de calcio y magnesio	225
11.6.5	Ajuste final de la recomendación de cal a aplicar en el cultivo del banano	226
	BIBLIOGRAFIA	227

