

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

**EVALUACIÓN DE ENMIENDAS PARA LA CORRECCIÓN DE ACIDEZ EN
SUELOS DEL VALLE DEL CAUCA Y CAUCA, COLOMBIA**

POR:

MANUEL EDGARDO REYES VALLEJO

TESIS

**PRESENTADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA COMO
REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO



CATACAMAS, OLANCHO

HONDURAS, C.A.

DICIEMBRE, 2011

**EVALUACIÓN DE ENMIENDAS PARA LA CORRECCIÓN DE ACIDEZ EN
SUELOS DEL VALLE DEL CAUCA Y CAUCA, COLOMBIA**

POR:

MANUEL EDGARDO REYES VALLEJO

MARÍA SARA MEJÍA M.Sc. CLAUDIA MARCELA ZAPATA Ing.
Asesores Principales, UNAL, Colombia

JOSÉ TRINIDAD REYES SANDOVAL M.Sc.
Asesor Principal, UNA, Honduras

**TESIS PRESENTADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA
COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO

CATACAMAS, OLANCHO

HONDURAS, C.A.

DICIEMBRE, 2011

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO por ser la luz y redentor del mundo que con su luz iluminó cada paso de mi camino, ha sido y será mi protector y mejor amigo.

A mis queridos, maravillosos y extraordinarios padres: Manuel de Jesús Reyes y Ana Bexy Vallejo Zelaya, por haberme brindado su confianza, apoyo moral, económico y su comprensión en cada uno y todos los momentos de mi vida, quienes con sus consejos y sus palabras de aliento me ayudaron a vencer todos los obstáculos que se presentaron en mi camino y así he llegado a culminar con éxito mi carrera como profesional.

A mi preciosa hermana Diana Mabel Reyes Vallejo, que de alguna u otra manera me brindó su apoyo y siempre confió en su hermanito para llegar a alcanzar hoy esta meta tan importante y deseada en mi vida.

A mis demás familiares que de una u otra manera estuvieron muy cerca apoyándome para que yo llegara hasta dónde hoy estoy.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS TODO PODEROSO por ser la fuente divina de sabiduría y de quién proviene el conocimiento y la inteligencia, por haber iluminado mi mente y guiado en cada paso de mi camino hacia el saber.

A mi familia por brindarme siempre todo su apoyo incondicional.

A mi Alma Máter, la Universidad Nacional de Agricultura en dónde pasé inolvidables momentos bajo cuyo albergue recibí el pan del saber, hoy parte importante de mi vida.

A mis asesores Sara Mejía de Tafur M.Sc. y Claudia Marcela Zapata Ing. en la Universidad Nacional de Colombia y Smurfit Kappa Cartón de Colombia S.A.; a Esmelym Obed Padilla M.Sc. y Ramón León Canaca M.Sc., en la Universidad Nacional de Agricultura, Honduras. Por compartirme sus valiosos conocimientos en la asesoría para la realización de mi práctica profesional supervisada.

A las personas que más que verme como un estudiante, como familia, los Tres Reyes de la Universidad Nacional de Agricultura, a mi asesor principal José Trinidad Reyes M.Sc. a Wilmer Misael Reyes M.Sc. y Javier Antonio Reyes M.Sc. por su innumerable apoyo y sus sabios consejos en los momentos difíciles de mi carrera.

Más que ser un amigo ami hermano Emilio José Fonseca Estrada “Milo”, solo puedo decir gracias “Primo” por todo lo que hemos vivido juntos. A la Clase “ARMAGEDON” 2011 por todo, a Josué Barahona “Campuso”, EverTurcios “Tribilin”, Gabriel Martínez “Betty”, Salvador Ávila “Sati” a los primos Nelson Degrandes “Confite” y Carlos Carrasco “Mono”, a Esdras Vásquez “Paisita”, Freddy Reyes “Malaria”, Darcy Martínez “Plabu”, Wilson Padilla “Coraje”, Bairon Sarmiento “Cabuto” Edwin Flores “Barrabas” Mario Mejía “Oso”, Mario Santos “El Burro” por todos los momentos juntos, siempre los tendré presente.

Contenido

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE ANEXOS	viii
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo General.....	2
2.2. Objetivos Específicos	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA	3
3.1. Acidez de los suelos.....	3
3.2. Características de los suelos ácidos	3
3.3. Causas de la acidificación de los suelos	4
3.3.1. Altos contenidos de materia orgánica y laboreo de suelo	4
3.3.2. Uso de fertilizantes nitrogenados y su efecto en el pH del suelo	5
3.4. Razones de baja fertilidad de los suelos ácidos	5
3.4.1. Toxicidad de Al	5
Efecto del encalado en la toxicidad de aluminio.....	7
3.4.2. Deficiencia de Ca y Mg.....	7
3.4.3. Deficiencia de Mo	9
3.4.4. Toxicidad de Mn	9
3.4.5. Retención de P.....	10
Efectos del encalado sobre la disponibilidad de fósforo	11

3.4.6. Toxicidad de H^+	12
3.5. Reacciones del encalado en los suelos.....	12
3.6. Relación acidez – cultivo.....	14
3.7. Criterios para diagnosticar problemas de acidez	14
3.8. Estimación de la dosis de cal para neutralizar la acidez del suelo.....	16
3.9. Efectos del encalado sobre la disponibilidad de nutrientes	16
3.9.1. Materiales para el encalado	17
Óxido de calcio o cal viva (CaO).....	17
Hidróxido de calcio o cal apagada (Ca (OH) ₂)	17
Carbonato de calcio (Calcita) (CaCO ₃).....	18
Carbonato doble calcio y magnesio (Dolomita) (CO ₃ + MgCO ₃)	18
Carbonatos. Su uso en la agricultura de Colombia	19
Yeso (CaSO ₄ . 2H ₂ O)	21
3.10. Efectos y beneficios del encalado.....	21
3.10.1. Efectos del encalado.....	21
3.10.4. Fijación de nitrógeno.....	22
3.10.5. Propiedades físicas del suelo.....	23
3.10.6. Respuesta a la fertilización.....	24
3.11. Sobreencalado.....	24
3.11.1. Las consecuencias del sobreencalado	25
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	25
4.1. Ubicación del experimento	25
4.2. Materiales y equipos	25
4.3. Prácticas de campo	25
4.5. Riego	26
4.6. Enmiendas a utilizar	27
4.4. Manejo del experimento	27
4.6. Descripción de tratamientos	27

4.7. Diseño experimental	28
4.8. Variables evaluadas	29
pH del suelo.....	29
Altura de planta (cm).....	29
Diámetro del cuello de la raíz (mm).....	30
Área foliar (cm ²).....	30
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
VI. CONCLUSIONES.....	55
VII. RECOMENDACIONES	56
VIII. BIBLIOGRAFÍA	56
IX. ANEXOS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la reacción de desplazamiento y neutralización del aluminio de intercambio por efecto del encalado.	13
Figura 2. Mapa de fertilidad de los suelos de Colombia (Jaramillo, 2004).....	20
Figura 3. pH promedio del suelo con los diferentes tratamientos en Cabuyerita.....	39
Figura 4. pH promedio del suelo con los diferentes tratamientos en Sonora	41
Figura 5. pH promedio del suelo con los diferentes tratamientos en San José	42

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Cantidad de enmiendas a aplicar en el suelo.....	27
Cuadro 2.	Descripción de Tratamientos.....	28
Cuadro 3.	Resultados de análisis químico inicial del suelo Cabuyerita, Cauca	35
Cuadro 4.	Resultados de análisis químico inicial del suelo Sonora, Darién, Valle ..	36
Cuadro 5.	Resultados de análisis completo inicial del suelo San José, Cauca	37
Cuadro 6.	Prueba de media para pH del suelo con los diferentes tratamientos en Cabuyerita	39
Cuadro 7.	Prueba de media para pH del suelo con los diferentes tratamientos en Sonora	40
Cuadro 8.	Prueba de media para pH del suelo con los diferentes tratamientos en San José.....	42
Cuadro 9.	Prueba de medias para altura de plantas de eucalipto en los diferentes tratamientos en Cabuyerita.....	45
Cuadro 10.	Prueba de medias para altura de plantas de eucalipto en los diferentes tratamientos en Sonora	46
Cuadro 11.	Prueba de medias para altura de plantas de eucalipto en los diferentes tratamientos en San José	47
Cuadro 12.	Prueba de medias para diámetro de cuello de raíz de plantas de eucalipto en Cabuyerita.....	49
Cuadro 13.	Prueba de medias para diámetro de cuello de raíz de plantas de eucalipto en Sonora	50
Cuadro 14.	Prueba de medias para diámetro de cuello de raíz de plantas de eucalipto en San José	51
Cuadro 15.	Prueba de medias para área foliar de plantas de eucalipto en Cabuyerita	53
Cuadro 16.	Prueba de medias para área foliar de plantas de eucalipto en Sonora...	54
Cuadro 17.	Prueba de medias para área foliar de plantas de eucalipto en San José	55

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Cálculos para determinar la cantidad de enmienda al suelo para cada tratamiento.....	60
Anexo 2. Análisis de varianza para pH a los 10 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca	65
Anexo 3. Análisis de varianza para pH a los 20 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca	65
Anexo 4. Análisis de varianza para pH a los 35 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca	65
Anexo 5. Análisis de varianza para pH a los 50 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca	65
Anexo 6. Análisis de varianza para pH a los 10 dda en el suelo Sonora, Darién, Valle	66
Anexo 7. Análisis de varianza para pH a los 20 dda en el suelo Sonora, Darién, Valle	66
Anexo 8. Análisis de varianza para pH a los 35 dda en el suelo Sonora, Darién, Valle	66
Anexo 9. Análisis de varianza para pH a los 50 dda en el suelo Sonora, Darién, Valle	66
Anexo 10. Análisis de varianza para pH a los 10 dda en el suelo San José, Cauca..	67
Anexo 11. Análisis de varianza para pH a los 20 dda en el suelo San José, Cauca...	67
Anexo 12. Análisis de varianza para pH a los 35 dda en el suelo San José, Cauca..	67
Anexo 13. Análisis de varianza para pH a los 50 dda en el suelo San José, Cauca...	67
Anexo 14. Análisis de varianza para altura de planta a los 44 ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca	68
Anexo 15. Análisis de varianza para altura de planta a los 59 ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca	68
Anexo 16. Análisis de varianza para altura de planta a los 74 ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca	68

Anexo 17. Análisis de varianza para altura de planta a los 44 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle	68
Anexo 18. Análisis de varianza para altura de planta a los 59 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle	69
Anexo 19. Análisis de varianza para altura de planta a los 74 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle	69
Anexo 20. Análisis de varianza para altura de planta a los 44 ddt en el suelo San José, Cauca	69
Anexo 21. Análisis de varianza para altura de planta a los 59 ddt en el suelo San José, Cauca	69
Anexo 22. Análisis de varianza para altura de planta a los 74 ddt en el suelo San José, Cauca	70
Anexo 23. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 50 ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca	70
Anexo 24. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 59 ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca	70
Anexo 25. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 74 ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca	70
Anexo 26. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 50 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle	71
Anexo 27. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 59 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle	71
Anexo 28. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 74 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle	71
Anexo 29. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 50 ddt en el suelo San José, Cauca	71
Anexo 30. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 59 ddt en el suelo San José, Cauca	72
Anexo 31. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 74 ddt en el suelo San José, Cauca	72

Anexo 32. Análisis de varianza para área foliar a los 50 ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca.....	72
Anexo 33. Análisis de varianza para área foliar a los 50 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle	72
Anexo 34. Análisis de varianza para área foliar a los 50 ddt en el suelo San José, Cauca.....	73

Reyes Vallejo, M. E. 2011. Evaluación de enmiendas para la corrección de acidez en suelos del Valle del Cauca y Cauca, Colombia. Tesis Ing. Agr. Catacamas, Olancho. Universidad Nacional de Agricultura. Pág. 85.

RESUMEN

El experimento se realizó en el invernadero de la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira en el departamento del Valle del Cauca, de junio al de septiembre de 2011. Se evaluó la eficiencia de enmiendas para la corrección de acidez en suelos del Valle del Cauca y Cauca, Colombia. Por medio de materiales encalantes como óxido de calcio (CaO), hidróxido de calcio Ca(OH)_2 y carbonato de calcio (CaCO_3) en diferentes dosis para neutralizar 80 y 90% del aluminio presente en los tres tipos de suelos evaluados, y un testigo sin incorporación de cal, para comparar su efecto en el tiempo sobre el aumento de pH y parámetros de crecimiento de la planta de eucalipto utilizada como indicadora como; área foliar, diámetro de cuello de raíz y altura de planta. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con prueba de Tukey. Resultando para los suelos de Cabuyerita, Departamento de Cauca y Sonora, Departamento del Darién, Valle la aplicación de 1000 kg ha^{-1} de Ca(OH)_2 se presentó como el mejor de todos debido a que aumentó significativamente el pH con respecto a los demás tratamientos en el tiempo. Y en San José, Departamento de Cauca, la aplicación de 800 kg ha^{-1} de CaO . Durante la realización del experimento se logró reconocer que la planta de eucalipto se adapta muy bien a pH ácidos ya que a medida el pH fue en aumento los parámetros de crecimiento de la planta fueron menores.

Palabras claves: Enmiendas, corrección de acidez, aluminio, óxido de calcio, carbonato de calcio, hidróxido de calcio.

I. INTRODUCCIÓN

En el trópico, debido a las condiciones medio ambientales imperantes, especialmente altos regímenes de precipitación, es natural encontrarse con una alta acidez debido al lavado de las bases como calcio, magnesio, potasio, etc., induciendo a una baja disponibilidad de fósforo y una predominancia de aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn), e hidrógeno (H), que además de ser tóxicos para las plantas, son los responsables de dicha acidez (Navarro, 1985).

En general, cuando el pH (en agua) del suelo se encuentra entre valores de 5.5-6.5, se logra una buena nitrificación y un buen suministro de Ca y Mg, con pocos problemas de deficiencias de elementos menores como Fe, Mn, Cu y Zn y una disponibilidad de P adecuada. Cuando los valores de pH son inferiores a 5.5, las condiciones de acidez aumentan, presentándose con frecuencia toxicidades de Al, Fe y Mn; así como deficiencias de Mo y P, elementos que precipitan en conjunto con los óxidos e hidróxidos de Fe y Al. Es bajo estas condiciones que se requiere encalado y otras prácticas de manejo de suelo que permitan corregir los problemas mencionados, para los cultivos que así lo requieran (Molina, s.f).

En el presente trabajo se evaluaron tres materiales encalantes y su efecto en la neutralización del Al al aumentar el pH en tres suelos forestales, tomando el pH postaplicación de cal y otras variables de crecimiento fisiológico de la planta indicadora de eucalipto. Al final se determinó cuál fue el tipo de enmienda aplicada al suelo más eficiente en tiempo y dinero. Se trabajó con la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia S.A en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira para llevar a cabo dicho experimento.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Evaluar la aplicación de tres enmiendas calcáreas para la corrección de acidez en suelos del Valle del Cauca y Cauca, Colombia.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar el tipo de enmienda calcárea más eficiente para la neutralización de la acidez de los suelos.
- Identificar el tipo de enmienda que muestre resultados favorables de neutralización de aluminio y aumento de pH en un menor período de tiempo.
- Determinar los aspectos de crecimiento fisiológico de la planta indicadora *Eucalyptus grandis* en cada tipo de suelo mejorado con la enmienda calcárea.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Acidez de los suelos

La acidez presente en el suelo es el proceso por el cual aumenta la concentración de iones H^+ , normalmente provenientes del Al^{3+} intercambiable y de grupos orgánicos ácidos, alcohólicos y fenólicos. La acumulación de iones H^+ se da tanto por adición de dichos iones o por pérdida de bases en la solución del suelo. La acidificación reduce la disponibilidad de nutrimentos del suelo (P, K, Ca y Mg), provoca la movilización de elementos tóxicos como el Al, incrementa la movilidad de metales pesados y provoca variaciones en la estructura de la microflora y microfauna (Molina, s.f).

3.2. Características de los suelos ácidos

La acidez provoca una serie de procesos físico-químicos y biológicos que afectan negativamente el crecimiento de las plantas. Los suelos ácidos se caracterizan por presentar:

- a) Reducida actividad microbiana, especialmente la bacterial
- b) Baja saturación de bases cambiables
- c) Baja Capacidad de Intercambio Catiónico
- d) Contenidos elevados de aluminio intercambiable
- e) Diferentes grados de toxicidad de Al, Mn y Fe
- f) Alta capacidad de fijación de P
- g) Cantidades reducidas de fósforo, Ca, Mg, Cu y Mo disponible
- h) Alto grado de desbalances catiónicos

i) Posible efecto sobre el proceso de agregación de los suelos (Chávez, 1986).

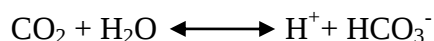
3.3. Causas de la acidificación de los suelos

La acidez de los suelos tiene diferentes y variadas causas. Unas son de origen natural y otras provocadas por el hombre, a través del manejo. Entre las de origen natural están la alta caída pluviométrica característica de aquellas zonas con mucha precipitación. El agua que pasa a través de los poros del suelo arrastra los cationes de intercambio, especialmente los que se encuentran menos fuertemente ligados a la arcilla (K y Na), dejando lugar a cationes de mayor fuerza iónica como el Al y Fe.

El movimiento de cationes a capas inferiores del suelo (lixiviación) contribuye a la acidificación debido a que la presencia de aniones (iones de carga negativa), forman pares iónicos, arrastrando los cationes con el movimiento del agua (Bernier, 2006).

3.3.1. Altos contenidos de materia orgánica y laboreo de suelo

La materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos produciendo constantemente anhídrido carbónico (CO₂), que fácilmente se transforma en bicarbonato (HCO₃⁻) de acuerdo a la siguiente reacción:



Esta reacción aporta H⁺ que disminuye el pH del suelo, incrementando su acidez.

La estructura química de la materia orgánica de los suelos es muy variada, y depende de los materiales residuales (vegetales o animales) desde donde se origina. En general, en condiciones favorables de temperatura y humedad en el suelo, los residuos orgánicos son atacados (oxidados) por la flora microbiana y transformados en productos minerales (mineralización), generando reacciones que liberan H⁺ que son agentes ácidos (Bernier, 2006).

3.3.2. Uso de fertilizantes nitrogenados y su efecto en el pH del suelo

Actualmente el mercado de fertilizantes ofrece variados productos que aportan N a cultivos y praderas. El nitrógeno que se encuentra en los fertilizantes puede estar como nitrato (NO_3^-), como amonio (NH_4^+) o como amida (NH_2) en el caso de la urea.

Las plantas absorben el N preferentemente como nitrato, aunque también absorben amonio. Cuando estas plantas absorben nitrógeno en la forma de amonio no se produce la reacción de nitrificación que libera H^+ .

Los nitratos producen una reacción alcalina en el suelo (aumenta pH), resultando equivalente a una aplicación de CaCO_3 . En cambio, los fertilizantes amoniacales o la urea producen una reacción ácida, la que debería ser neutralizada por una cantidad determinada de carbonato de calcio (Bernier, 2006).

3.4. Razones de baja fertilidad de los suelos ácidos

3.4.1. Toxicidad de Al

Cuando el Al se acumula en suelo en cantidad elevada, puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas poco tolerantes a su presencia. Las cantidades del elemento consideradas como tóxicas se estiman en más de 1 mg L^{-1} de Al^{+3} en la solución del suelo o en forma relativa a la sumatoria de bases en el suelo en más de 60% de saturación de Al^{+3} . El exceso de Al en la solución del suelo interfiere en la división celular, reduciendo el crecimiento de las raíces (Molina, s.f).

En condiciones de acidez, iones como Al^{3+} y Mn^{3+} se encuentran en la solución del suelo. Estos elementos aunque estén en bajas concentraciones, son tóxicos para la mayoría de los cultivos. El término toxicidad en el caso del aluminio se refiere a varios aspectos que

afectan el normal desarrollo de las plantas sensibles a la acidez, lo que reduce su crecimiento y desarrollo. La presencia de altas concentraciones de Al en la solución del suelo inhiben también la absorción de calcio y magnesio por las plantas (Bernier, 2006).

El crecimiento deficiente de un cultivo en un suelo ácido puede correlacionarse directamente con la saturación de Al. El pH por sí solo no tiene efecto directo en el crecimiento de las plantas, excepto a valores inferiores a 4.2, donde la concentración de iones hidrógeno puede detener y hasta invertir la absorción de cationes por la raíz (Black, citado por Iriarte, 1993). La toxicidad de aluminio se presenta en el suelo cuando su concentración alcanza niveles que la planta no puede tolerar (Fassbender, citado por Iriarte, 1993).

La infertilidad de los suelos ácidos se debe a uno o más de los siguientes factores: toxicidad alumínica, deficiencia de calcio y magnesio y toxicidad de manganeso (Sánchez, citado por Iriarte, 1993). El efecto visual más notable se presenta en las raíces de las plantas. Las raíces principales interrumpen su crecimiento y ocurre una proliferación lateral de las raíces secundarias, estas son gruesas, presentan puntos muertos y son poco ramificadas en raicillas finas; otros efectos son:

- El Al se enlaza con el P de la molécula de ADN impidiendo su función celular y síntesis de proteína.
- Puede llegar a ser tóxico para los microorganismos del suelo.

Concentraciones de Al en la solución del suelo superiores a 1 ppm frecuentemente son causa directa de reducción directa en los rendimientos. La toxicidad de Al puede corregirse por medio de encalamiento hasta llegar a pH entre 5.5 y 6.0 para precipitar el Al intercambiable con el hidróxido de Al (Iriarte, 1993).

Efecto del encalado en la toxicidad de aluminio

El mayor efecto beneficio del encalado de suelos ácidos es la reducción en la solubilidad del Al y Mn. 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 (Haynes y Naidu, 1998, citado por Espinosa).

3.4.2. Deficiencia de Ca y Mg

Los suelos ácidos tienen una cantidad de cationes intercambiables baja (menor a $5 \text{ cmol (+)} 1^{-}$), por lo que la disponibilidad de elementos como el Ca o el Mg no es suficiente para lograr el crecimiento óptimo de la mayoría de los cultivos. La presencia de alto contenido de Al en la solución del suelo inhibe la absorción de Ca y Mg por la raíces de las plantas.

Una deficiencia de calcio y magnesio en el suelo se manifestará en forma de achaparramiento de la planta y deformación y amarillamiento de las puntas de las hojas (Hanna, s.f).

Los síntomas de deficiencia de calcio son fáciles de observar y muy espectaculares. Las regiones meristemáticas (de crecimiento) de los tallos, hojas y raíces son atacadas fuertemente y pueden acabar muriendo, cesando el crecimiento de estos órganos. Las raíces pueden acortarse, en los bordes de las hojas jóvenes aparece clorosis seguida de necrosis. También es un síntoma más fácil de reconocer la forma de gancho que adquieren las puntas de las hojas. Debido a su inmovilidad dentro de la planta los síntomas aparecen primero en las hojas jóvenes (Minerales, s.f).

Se presentan deficiencias de calcio fundamentalmente en suelos ácidos. También en suelos calizos pueden producirse deficiencias de este elemento ya que a pesar de encontrarse en grandes cantidades, lo está en forma de carbonato que es insoluble (Haynes y Naidu, citado por Espinosa, s.f).

El Mg es un elemento importante en la nutrición de plantas ya que es un constituyente fundamental de la clorofila, pigmento que dá el color verde a las hojas. Además, éste 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 (Haynes y Naidu, citado por Espinosa, s.f).

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 minerales de alta solubilidad que se aplican en dosis relativamente moderadas.

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 Mg, es la fuente de mayor concentración de este elemento. Normalmente se utiliza como materia 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 esté 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 (Haynes y Naidu, citado por Espinosa, s.f).

El magnesio es un componente básico de la clorofila y por lo tanto, un nivel óptimo es vital para la fotosíntesis. La deficiencia de magnesio generalmente ocurre en suelos ácidos de poca fertilidad con bajo contenido de bases, y en suelos derivados de cenizas volcánicas con niveles relativamente altos de calcio y potasio (CIAT, 1980).

3.4.3. Deficiencia de Mo

Esta deficiencia ocurre principalmente con leguminosas, en la cual el Mo es esencial para la nodulación y fijación de N; normalmente se corrige con adiciones de 0.05 a 0.2 kg Mo ha⁻¹.

En general, para corregir este problema, los abonos de Mo se necesitan en pequeñas dosis. Se utilizan para abonar directamente el suelo y como abono foliar. Las sales solubles molibdato de sodio y de amonio son las más importantes al disponer el Mo en forma directamente disponible. Se pueden utilizar como abono directamente al suelo (en ese caso, al requerirse cantidades muy pequeñas, se mezclan con otros abonos) o como abono foliar.

Los abonos insolubles utilizados son compuestos de Mo que se transforman en molibdatos solubles como el molibdato de Ca y el óxido de Mo. Son abonos de efecto lento, pero no son utilizados con mucha frecuencia (Molina, s.f).

3.4.4. Toxicidad de Mn

En algunos casos, en Australia se menciona como problema la toxicidad de Mn cuando el pH del suelo disminuye; en suelos ácidos con problemas de mal drenaje, la toxicidad de Mn suele ser común, afectándose negativamente el crecimiento de las plantas. La toxicidad de Mn ha sido reportada en algunos Ultisoles e Inceptisoles ácidos de Costa Rica, donde se

asocia a la presencia de altos contenidos de óxidos de Mn en el material parental se esos suelos (Molina, s.f).

El Mn es muy soluble a valores de pH menores de 5.5; contrariamente al Aluminio, el Mn es un nutriente de las plantas, por lo tanto la finalidad no es eliminar el Mn soluble, sino mantenerlo dentro de un ámbito entre toxicidad y deficiencia. Una concentración en la solución del suelo entre 1 y 4 ppm de Mn, representa ese ámbito, aun cuando hay una variabilidad considerable entre los suelos (Sánchez, citado por Iriarte, 1993).

En caso de toxicidades extremas, luego que la parte foliar ha sido severamente afectada, se presenta necrosis en las raíces. En muchos pastos tropicales, la toxicidad de Mn manifiesta en forma de pequeñas manchas negras en las hojas y algunas veces se presenta síntomas de deficiencia de Fe inducida por el exceso de Mn.

El problema de toxicidad de Mn también puede corregirse con encalamiento a niveles de pH de 5.5 a 6.0, con los cuales la solubilidad del Mn disminuye lo suficiente (Iriarte, 1993).

3.4.5. Retención de P

La presencia de cantidades altas de Al y Fe intercambiables, aunadas a un aumento en la cantidad de carga positiva en las micelas de cambio de suelos ácidos, hace que la disponibilidad del P adicionado como fertilizante a estos suelos disminuya temporalmente. Este fenómeno se conoce como retención de P, y se refiere a que el P se retiene en el suelo con una fuerza mayor a la que tienen las plantas para absorberlo.

En suelos ácidos tropicales, el Al y Fe presentes en los minerales arcillosos se libera a la solución del suelo cuando el pH es menor de 5.3, y reaccionan con el P para formar fosfatos de Al y Fe que son solubles, y que disminuyen la disponibilidad del elemento para las plantas (Molina, s.f).

La aplicación de cal no produce liberación de fósforo de formas retenidas o fijadas en el suelo, o de formas insolubles. Sin embargo, favorece la disponibilidad del fósforo aplicado después del encalado. La cal bloquea algunos sitios reactivos del complejo coloidal, impidiendo que éstos atraigan los iones fosfato que están en la solución del suelo y fijen. De este modo queda más fosforo disponible para ser absorbido por las plantas (Bernier, 2006).

Efectos del encalado sobre la disponibilidad de fósforo

La relación entre el pH del suelo y el tipo de arcilla es importante para diferenciar los mecanismos envueltos en la disponibilidad del P (Haynes y Naidu, citado por Espinosa, s.f).

Aquellos suelos dominados por arcillas de tipo 2:1 (Esmectitas) no tienen una superficie reactiva y 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 a partir de aproximadamente pH 6.5, permite el rompimiento de la estructura de los minerales arcillosos y en consecuencias libera Al y Fe (Haynes y Naidu, citado por Espinosa, s.f).

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.

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 presentes en estos suelos (Haynes y Naidu, citado por Espinosa, s.f).

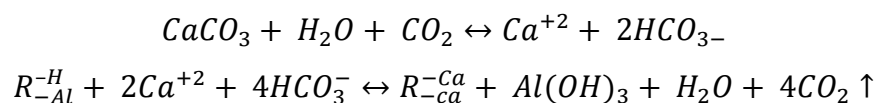
3.4.6. Toxicidad de H^+

La presencia de cantidades tóxicas de iones H^+ en suelos orgánicos o elevados en materia orgánica, también puede constituirse en una causa de infertilidad del suelo. En síntesis, para la mayoría de las especies, se puede indicar que los problemas de baja fertilidad (acidez) aumentan cuando se presentan las siguientes condiciones en el suelo: **pH:**<5.5, **la acidez o Al Intercambiables:** >0.5 cmol (+) L^{-1} , **la suma bases (Ca + Mg + K):**<5 cmol (+) L^{-1} y la **saturación de acidez:**>20% (Molina, s.f).

3.5. Reacciones del encalado en los suelos

El encalado en los suelos consiste en agregar al suelo cualquier compuesto de calcio y magnesio que sea capaz de reducir la acidez e incrementar el pH. Estrictamente, la cal es el óxido de calcio; sin embargo, el término cal también se aplica a otros materiales encalantes como hidróxidos, carbonatos y silicatos de calcio, o de calcio y magnesio.

El objetivo central de las enmiendas calcáreas es desplazar el aluminio (o manganeso) intercambiable en la fase sólida del suelo y neutralizar el ion Al^{3+} libre en la solución del suelo. Las reacciones básicas de la enmienda en el suelo, representadas por el caso del carbonato de calcio (calcita), son las siguientes (Brady y Weil, 2002).



Donde R representa una porción de un coloide orgánico o inorgánico.

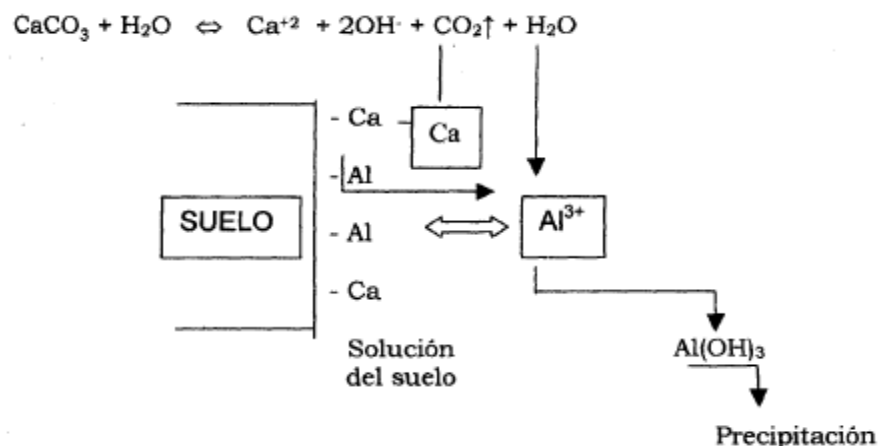


Figura 1. Esquema de la reacción de desplazamiento y neutralización del aluminio de intercambio por efecto del encalado.

Los mecanismos de reacción de los materiales encalantes permiten la neutralización de la acidez en solución del suelo al ponerse en contacto la cal con el agua del suelo. Es por esta razón que la cal es efectiva solamente cuando existe humedad en el suelo. Adicionalmente, el efecto correctivo de la cal se limitará al volumen de suelo donde fue aplicada.

Es interesante observar que el calcio proveniente de la disolución de la cal no interviene en las reacciones de incremento del pH. Este nutriente pasa simplemente a ocupar sitios en la superficie de las partículas del suelo y servirá como nutriente de las plantas (Suárez, 1994).

Los iones hidrogeno (H^+) y aluminio (Al^{+3}) liberados a la solución de suelo por el intercambio con Ca, reaccionan con los iones bicarbonato (HCO_3^-) provenientes de la hidrólisis de la cal, formando agua y precipitando el aluminio, con liberación de anhídrido carbónico (CO_2) que se disipa como gas. De esta manera, el aluminio tóxico de la solución de suelo queda neutralizado y químicamente inerte.

En el caso de utilizarse una cal dolomítica (carbonato doble de calcio y magnesio), la hidrólisis del material sigue la misma secuencia anterior, a la vez que se produce un

incremento en el contenido de magnesio del suelo en función de la concentración que presente la cal dolomítica.

En el ámbito agrícola se señala erróneamente a varios productos fertilizantes como correctores de la acidez del suelo por presentar contenidos importantes de calcio. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) no es producto alcalinizable como a veces se indica, sino de reacción neutra. Se tiende a confundir como efecto alcalinizante el hecho de aportar calcio, pero esto no le permite neutralizar los iones hidrogeno (H^+) y aluminio (Al^{+3}) de la solución de suelo (Suárez, 1994).

3.6. Relación acidez – cultivo

La presencia de altas concentraciones de Al en la solución del suelo inhiben la absorción de Calcio y Magnesio por las plantas. En condiciones de suelos ácidos (ya sean saturados o cansados por fertilizantes nitrogenados) pueden causar toxicidad de Mn cuando no se aplica Cal para elevar el pH (Malavolta, citado por Escoto, 1996).

Entre las especies de postura, varias gramíneas y leguminosas están bien adaptadas a condiciones de suelos ácidos, muchas especies han evolucionado en suelos ácidos y poseen genes responsables para la tolerancia de niveles altos de Al (Espinoza, citado por Navarro, 1985).

3.7. Criterios para diagnosticar problemas de acidez

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 generar una recomendación para solventar adecuadamente el problema. La mayor parte de la acidez en los suelos tropicales (excluyendo los suelos

orgánicos), proviene del Al intercambiable, por lo que generalmente se habla de acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$) y Al intercambiable, como si fueran sinónimos.

La acidez o Al 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 incluye el Al y el H intercambiables y en la solución del suelo, que son los que pueden perjudicar el crecimiento de las plantas. Cuando el valor de acidez intercambiable es mayor de $0.5 \text{ cmol (+)} \text{ L}^{-1}$, la mayoría de las plantas pueden presentar problemas de crecimiento. El valor óptimo de acidez intercambiable debería ser inferior a $0.3 \text{ cmol (+)} \text{ L}^{-1}$ (Molina, s.f).

La saturación de acidez es una medida del porcentaje del complejo de intercambio catiónico que está ocupado por Al y H. El valor de saturación de Al 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. La saturación de acidez (SA), se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\% SA = \frac{Ac. Int}{CICE} \times 100$$

Donde, la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) representa la sumatoria de $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al} + \text{H}$. Los dos últimos elementos se consideran como la Acidez Intercambiable (Ac. Int.). Es común aceptar que los valores de saturación de acidez mayores al 10% afectan negativamente el crecimiento de especies vegetales poco tolerantes a la presencia de Al, mientras que el valor de 60% se considera como el máximo para especies tolerantes a la acidez del suelo. El valor para la mayoría de las plantas oscila entre 10 y 25%.

El pH del suelo está directamente relacionado con el porcentaje de saturación de acidez, ya que el Al intercambiable precipita cuando el pH es superior a 5.5. Cuando el pH está por

debajo de ese valor, la solubilidad del Al se incrementa, al igual que el riesgo de causar toxicidad a las raíces (Molina, s.f).

3.8. Estimación de la dosis de cal para neutralizar la acidez del suelo

La siguiente fórmula para calcular la necesidad de cal para neutralizar la acidez del suelo se basa en el principio de linealidad entre la cantidad de producto neutralizante aplicado y la disminución del Al intercambiable del suelo. El criterio práctico que domina en la actualidad es utilizar una dosis de cal que reduzca la saturación de acidez del suelo a un nivel que sea tolerable para la especie (Molina, s.f).

$$\text{Ton. cal/ha} = \frac{T(V1-V2)}{PRNT} \times P$$

Donde:

$$T = \text{Meq/100cm}^3 \text{ H}^+ + \text{Al}^{3+} + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$$

V2 = 60% (valor de saturación de base al cual queremos llegar)

$$V1 = \frac{S}{T} \times 100 = \frac{\text{meq/100cm}^3 \text{ K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{T}$$

PRNT = Poder relativo de neutralización total de la cal

P = Factor de profundidad de incorporación, 0.5 para 0-10cm, 1.0 para 0.20cm, 1.5 para 0.30cm (Malavolta, citado por Escoto, 1996).

3.9. Efectos del encalado sobre la disponibilidad de nutrientes

Un factor importante en el encalado de los suelos es el grado de fineza o tamaño de las partículas a utilizarse. Esto se debe a que la velocidad de la reacción de la Cal en el suelo depende de la superficie de contacto con el suelo. Mientras más fino es el material, tiene más superficie de contacto y reacciona más rápido. Materiales como el Óxido de Calcio y el Hidróxido de Calcio son polvos finos por naturaleza y no tienen problemas de tamaño de partículas al aplicarse al suelo (Espinoza, citado por Escoto, 1996).

Cuando se utiliza Calcita o Dolomita es necesario asegurarse de que el material sea molido a un tamaño de partícula adecuado. Las partículas de cal gruesas, reaccionan de forma más lenta que las partículas finas.

El costo de Cal aumenta con el grado de fineza de la molienda. Lo ideal es utilizar un material que requiera un mínimo de molido y que a la vez tenga una cantidad suficiente de material fino que permita un cambio rápido en el pH. El mejor tamaño de la partícula es aquel que pasa una malla mayor a 60 mesh (Espinoza, citado por Escoto, 1996).

3.9.1. Materiales para el encalado

Dentro de los materiales más utilizados para el encalado de suelos tenemos:

Óxido de calcio o cal viva (CaO)

Se considera como el más eficiente y rápido neutralizante de acidez, sin embargo, tiene la desventaja de difícil manejo por sus características quemantes y fácil hidratación; presenta la mayor capacidad de neutralización (178%). Cuando se aplica al suelo reacciona de inmediato por lo cual, es útil cuando se requieren resultados rápidos debido a sus características y como una forma de evitar daños, este material debe ser aplicado con cierta antelación y mezclado inmediatamente con el suelo puesto que se endurece rápidamente haciéndose inefectivo.

Hidróxido de calcio o cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Es el óxido de calcio hidratado; presenta dificultad para su transporte y distribución en el campo por su alta hidratación; su capacidad de neutralización es del 136%. Es una

sustancia blanca, polvorienta, difícil y desagradable de manejar. Se prepara hidratando la cal viva. Este material reacciona también rápidamente en el suelo.

Cabe señalar que la cal viva y la cal apagada son productos que normalmente no se utilizan debido a su alto costo y a los riesgos que implica su manipulación en las actividades productivas.

Carbonato de calcio (Calcita) (CaCO_3)

Es el material más utilizado debido a sus ventajosas características de aplicación y precio, difiriendo las presentaciones que existen en el comercio en cuanto a su grado de molienda y pureza; su capacidad de neutralización de acidez es del 100% (Chávez, 1986).

Carbonato doble calcio y magnesio (Dolomita) ($\text{CO}_3 + \text{MgCO}_3$)

Su gran ventaja es la de incorporar además del calcio otro elemento importante como es el magnesio con un poder relativo de neutralización total (PRNT) del 105% (Espinoza, citado por Escoto, 1996).

Las cales calcínicas, dependiendo de su origen, pueden ser clasificadas como:

- De origen minero: estas cales presentan bajos contenidos de humedad pero con porcentajes de CaCO_3 levemente inferiores a las de las conchas marinas, porque poseen mayor contenido de inertes.
- Residuo o subproducto industrial (azúcar). Las cales derivadas de la industria del azúcar poseen altos contenidos de humedad y menores porcentajes de CaCO_3 .
- Moliendas de conchas marinas. Las cales de conchas marinas poseen los mayores contenidos de CaCO_3 junto con contenidos muy bajos de humedad.

- Minero industrial. Calcitas con contenido de óxido de calcio libre o hidróxido de calcio libre. Ambos productos son de alta solubilidad en agua y reaccionan inmediatamente en el suelo.

Las cals dolomíticas a su vez se pueden diferenciar por su contenido de magnesio en:

- Cal magnesiánica, con un contenido de 5.1 a 12% de MgO.
- Cal dolomítica, con un contenido superior al 12% de MgO.

La calidad de estos materiales depende del contenido de impurezas, como por ejemplo arcillas.

Cuando se evalúa la efectividad agronómica de las cals calcínicas respecto de las dolomíticas, es importante recordar que las calcínicas son el doble más solubles (50mg/L) que las dolomíticas (25mg/L) por su efecto corrector más rápido.

A su vez las cals dolomíticas presentan altos contenidos de magnesio (hasta 21% de MgO), el cual también debe ser valorado. En suelos con claras deficiencias de magnesio, las cals dolomíticas presentan ventajas comparativas puesto que la aplicación de magnesio resultará en incrementos de rendimiento.

Carbonatos. Su uso en la agricultura de Colombia

Al ser Colombia un país húmedo, los excesos de precipitaciones lixivian las bases del suelo, que incluyen a los cationes como el Ca, el Mg, el K y el Na, generando suelos ácidos (Castro, 2005).

La mayor parte de los suelos presentan baja fertilidad, la cual se manifiesta en condiciones de alta acidez, con altos contenidos de Al intercambiable, bajo contenidos de elementos nutricionales para las plantas como el P, Ca, Mg, y K; baja capacidad de suministrar N y S debido a la presencia de bajos contenidos y a la mala calidad de la materia orgánica que se

ha acumulado en ellos, presencia de altos contenidos de materiales coloidales inorgánicos de baja actividad en la fracción arcilla. Aproximadamente, 85% de los suelos del territorio nacional presentan valores de pH menores a 5.5 y el 57.6% tiene pH menor a 5 (Jaramillo, 2004).

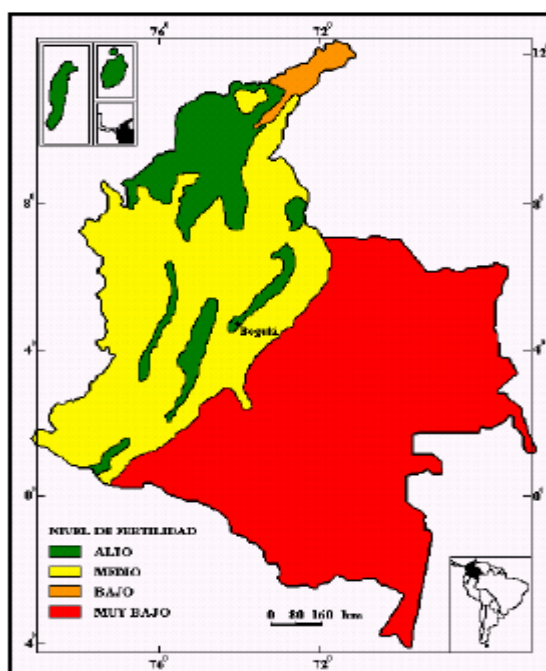


Figura 2. Mapa de fertilidad de los suelos de Colombia (Jaramillo, 2004)

Para el cultivo de café, Jaramillo (2004) estableció que el pH debe conservarse entre 5 – 5.5, el Ca no debe ser superior a 4,2 meq/100 g de suelo y si es menor de 2,6 meq/100g se debe encalar el suelo. Para el Mg se estableció un valor de $0,7 \pm 0,2$ meq/100 g como límite inferior aceptable. En cuanto a la suma de bases, se menciona que el 74% de los suelos cafeteros se encuentra con un valor inferior a los 5 meq/100g.

El consumo nacional actual de enmiendas calcáreas es bajo según la Unidad de Planeación Minera Energética, siendo de 2,000 Tm de carbonato de calcio, 8,700 Tm de óxido de magnesio y 6.000 Tm de sulfato doble de calcio y magnesio, cantidades muy inferiores a las necesarias para solucionar los problemas de acidez de los suelos.

Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Es utilizada en algunas ocasiones ya que constituye una de las fuentes relativamente más baratas y de fácil manejo. Se recomienda sin embargo, en aquellos suelos de características sódicas (Chávez, 1986).

3.10. Efectos y beneficios del encalado

3.10.1. Efectos del encalado

Los efectos del encalado sobre las propiedades del suelo pueden agruparse en tres:

- Cambios o efectos físicos
- Cambios o efectos biológicos
- Cambios o efectos químicos

Efectos físicos

En los suelos densos siempre existe la tendencia, por las partículas finas, a asociarse más cerradamente. Esta condición interfiere en el movimiento del aire y del agua y, por tanto la granulación resulta más favorable. En los suelo ácidos se fomenta una estructura granular favorable por la adición de cualquier clase de cales, a pesar que su influencia sea indirecta; por ejemplo, los efectos de la cal sobre las fuerzas bióticas son superiores, sobre todo las que intervienen en la descomposición de la materia orgánica del suelo y la síntesis del humus (Buckman, 1977).

Efectos biológicos

- La cal estimula el metabolismo general de los microorganismos del suelo.

- Aumenta la actividad microbiana, especialmente aquella relacionada con los procesos de degradación de la materia orgánica y fijación bacteriana del N (actividad comprobada en la caña de azúcar).
- Se estimula la fauna del suelo, especialmente las lombrices de tierra.
- La aminificación y amonificación y oxidación sulfúrica son fuertemente ayudadas por un aumento de pH.
- Las bacterias que fijan N del aire, tanto las libres como las simbióticas en los nódulos de las leguminosas, son estimuladas particularmente por la aplicación de las calas.
- La nitrificación, fenómeno biológico de gran importancia, requiere la presencia de cationes metálicos. Cuando la caliza es inadecuada, esta transformación deseable no se produce rápidamente.
- En efecto, el crecimiento normal de muchos microorganismos del suelo, que depende tanto del Ca como de las actividades biológicas, no puede realizarse satisfactoriamente si los suelos tienen un nivel de Ca y Mg inferior a lo normal (Buckman, 1977).

Efectos químicos

- Abastecimiento de Ca y Mg en caso de utilizar dolomita.
- Disminución de la solubilidad de Al, Fe y Mn lo que elimina posibles toxicidades.
- Aumento en la asimilación y disponibilidad de P, Mg, Cu y Mo.
- El porcentaje de saturación de base se incrementa.
- El aprovechamiento del K podría aumentar según las condiciones (Chávez, 1984).

3.10.4. Fijación de nitrógeno

En general, la acidez del suelo restringe la actividad de la mayoría de los microorganismos del suelo. El encalado mejora apreciablemente las condiciones del suelo y permite un adecuado desenvolvimiento de la actividad microbiana. Dentro de la actividad microbiana,

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 gracias a las adecuadas condiciones para el desarrollo de la bacteria (Haynes y Naidu, citado por Espinosa, s.f).

3.10.5. Propiedades físicas del suelo

El encalado de suelos ácidos tiene un efecto positivo en la 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 Al y Fe, formados como producto de la adición de la cal. Se considera que la acción floculante y cementante de los hidróxidos de Al formados después del encalado mejora apreciablemente la agregación de los suelos ácidos con alto contenido de Al intercambiables.

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, citado por Espinosa, s.f).

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, citado por Espinosa).

3.10.6. Respuesta a la fertilización

El encalado mejora la respuesta a la aplicación de fertilizantes en suelos ácidos. Esto se debe fundamentalmente las mejores condiciones físicas y químicas que el suelo adquiere después de la aplicación de la cal, produciendo un 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.

El efecto de la fertilización balanceada se expresa mejor cuando la acidez ha sido eliminada como factor limitante. Es este caso, la efectividad de estas prácticas agronómicas se observa en el rendimiento y en la rentabilidad de los cultivos (Haynes y Naidu, 1998, citado por Espinosa).

3.11. Sobreencalado

Se entiende por sobreencalado, la utilización de dosis mayores de cal necesarias para neutralizar el Al intercambiable. Aunque en el pasado se creía que dosis de encalado mayores de 2-3 Tonha⁻¹ podían asociarse con este tipo de problemas, actualmente se conoce que los suelos tropicales ácidos pueden recibir dosis de 5 a 10 Tonha⁻¹, sin causar un deterioro de sus propiedades químicas y físicas. Esto por cuanto los suelos ácidos de los trópicos presentan una alta capacidad amortiguadora que resiste los cambios fuertes de pH aun con dosis altas de Cal (Molina, s.f).

El efecto de sobreencalado ha ocurrido cuando por desconocimiento de las particularidades de los suelos tropicales, se ha imitado las prácticas de encalado realizadas en la zona templada que suponen corregir los problemas de acidez, llevando los suelos hasta la neutralidad mediante la aplicación de cal.

Como los suelos tropicales son esencialmente sistemas de óxidos, alofánicos o sistemas de aluminosilicatos laminares con revestimientos de Óxidos, estas prácticas no funcionan, debido a la presencia de extensos mecanismos amortiguadores que impiden cambios progresivos en el pH. En estos suelos, después que se ha neutralizado la acidez debida a Al (pH 5.5), se requieren cantidades exorbitantes de cal para variar el pH en una unidad (Molina, s.f).

3.11.1. Las consecuencias del sobreencalado

- Disminución del rendimiento por afectarse otras funciones del suelo y de la planta.
- Disminución de la disponibilidad de algunos nutrientes:
 - P: debido a que se favorece la formación de fosfatos insolubles de Ca.
 - B: las condiciones básicas favorecen el fenómeno de adsorción de B en suelos con capacidad de sorción de aniones.
 - Zn: disminuye su solubilidad cuando sus pH se acercan a niveles 6-7.
 - Mn: en pH superiores a 6.2 el Mn tiende a precipitar en presencia de Óxidos de Fe y Al.
- Deterioro de la estructura. Al subir el pH, el Fe se transforma, y su efecto agregante disminuye, por lo tanto se forman agregados más pequeños que reducen las tasas de infiltración y pueden favorecer la erosión. Esto también puede deberse a un aumento de la actividad microbiana que degrada los agentes cementantes de tipo orgánico (Molina, s.f).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Ubicación del experimento

La investigación se realizó durante los meses de Junio a Septiembre de 2011 en el Invernadero de la Facultad Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, ciudad de Palmira, departamento del Valle de Cauca, con una ubicación georeferencial de 3° 31' latitud norte, -76° 20' longitud oeste; temperatura media anual de 23 °C, altitud de 1.001 m, humedad relativa promedio de 70- 80 % y una precipitación media anual de 2,050 mm (Aguilar, 2010).

4.2. Materiales y equipos

Para la realización del experimento se utilizaron bolsas de polietileno con capacidad de 6kg de suelo y las siguientes sales agrícolas: óxido de calcio o cal viva (CaO), carbonato de calcio (Calcita) (CaCO_3), e hidróxido de calcio o cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); suelo procedente de laderas de la meseta de Popayán en el Departamento de Cauca y en laderas en Darién, Departamento del Valle del Cauca, sacos para la recolección del suelo, barreno, pala, balanza de precisión, Potenciómetro, máquina medidora de área foliar, Pié de Rey, cinta métrica, cámara fotográfica, libreta de campo, entre otros.

4.3. Prácticas de campo

Inicialmente se sustrajo el suelo de laderas en los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, Colombia. Limpiando la primera capa orgánica del suelo, se introdujo el barreno a una profundidad entre 25-30cm (profundidad efectiva de los suelos forestales), para obtener

15 submuestras por suelo para el análisis y recolectar aproximadamente 10kg de donde se obtuvo cada submuestra para un total de 150kg por tipo de suelo para realizar el experimento. Después de recolectado todo el suelo se trasladó al Invernadero de la Universidad Nacional de Colombia, Palmira donde se realizó el experimento.

Las 15 submuestras de cada suelo fueron mezcladas para obtener así una muestra representativa de éste, luego de realizar la mezcla se escogió 1 kg de este suelo y se puso a secar al aire libre para ser mandado posteriormente al laboratorio del CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) para obtener el análisis químico completo.

De cada suelo para el experimento se recolectaron 150kg, de igual manera se mezclaron para obtener un suelo representativo al de campo para realizar la práctica; posterior a esto, se realizó el llenado de bolsas (cada una de 5kg). Luego se organizaron en los mesones del invernadero.

4.4. Siembra del eucalipto

Una vez llenas las bolsas con 5kg de suelo, se humedeció para continuar con el ahoyado y realizarla plantación, con ayuda de una espátula se presionó la raíz con el sustrato con el fin de asegurar el contacto entre estos para facilitar la adaptación del brinjal y evitar espacios libres que le facilita la proliferación de algunos microorganismos que le puedan causar daños (Biotec, 2010).

4.5. Riego

Se dio una frecuencia de tres veces por semana, donde el riego por aspersión fue controlado para evitar el encharcamiento dentro del invernadero y así evitar la proliferación de los hongos producto del exceso de humedad (Biotec, 2010).

4.6. Enmiendas a utilizar

Cuadro 1. Cantidad de enmiendas a aplicar en el suelo

Tratamiento	Descripción	Cantidad de enmienda aplicada (g)		
		Cabuyerita	Sonora	San José
1	Sin aplicación de cal	0	0	0
2	CaO neutralización del 80% Al	1.8	1.8	1.8
3	CaO neutralización del 90% Al	2.02	2.02	2.02
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	3.0	3.0	3.0
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	3.38	3.38	3.38
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	2.2	2.2	2.2
7	Ca(OH) neutralización del 90% Al	2.45	2.45	2.45

Una vez hechos los cálculos se procedió a la organización para pesar la cal, distribuir y aplicar los correctivos en el suelo, luego se dejó reaccionar los materiales (Incubación). Para posteriormente realizar la toma de datos respectiva a los 10 ddt.

4.4. Manejo del experimento

Una vez ya establecido el experimento el suelo se mantuvo húmedo de manera que la cal pudiera hacer su efecto en el suelo.

4.6. Descripción de tratamientos

En el experimento se pretendió neutralizar el 80 y 90% de saturación de aluminio presente en el suelo. Los tratamientos fueron:

Cuadro 2. Descripción de Tratamientos

Tratamiento	Descripción	% de Al a neutralizar
1	Testigo sin aplicación de cal	0
2	Óxido de calcio	80%
3	Óxido de calcio	90%
4	Carbonato de calcio	80%
5	Carbonato de calcio	90%
6	Hidróxido de calcio	80%
7	Hidróxido de calcio	90%

4.7. Diseño experimental

Se utilizó el diseño de bloques completos al azar, los tratamientos a evaluar fueron 3 tipos de enmienda al suelo en dos dosis con 4 repeticiones cada tratamiento más un tratamiento testigo sin aplicación de enmienda.

Modelo aditivo lineal para un Diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + T_i + \epsilon_{ij} \quad \text{donde:}$$

Y_{ij} = Variable aleatoria observable

μ = Media general

β_i = Efecto de bloques

T_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

ϵ_{ij} = Error experimental

4.8. Variables evaluadas

pH del suelo

El pH se determinó al inicio antes de aplicar la enmienda para tener un parámetro de partida para posteriormente evaluar la eficiencia del correctivo al suelo. Una vez aplicada la cal, el suelo se mantuvo húmedo siempre, para que la cal actuara y tener una reacción eficiente.

Al inicio, la medición de pH fue de manera general en los tres suelos ya que éste era cada uno igual y se realizó de la manera siguiente.

El método utilizado fue mediante potenciómetro, en el cual se tomó suelo y se pesaron 50g por cada uno, se mezclaron con 50ml de agua destilada con una relación 1:1 en un beaker con capacidad de 150ml hasta formar una pasta. Una vez formada la pasta de cada suelo se introdujo al electrodo para realizar la lectura.

La primera medición de pH en los suelos se realizaron a los 10 días después de la aplicación, a los 20 días para la segunda, a los 35 días para la tercera y a los 50 días para la cuarta medición, removiendo la primera capa de suelo con restos de cal para así no interferir en el resultado del pH, tomando los mismos parámetros que al inicio.

Altura de planta (cm)

La altura de la planta se midió al inicio del trasplante en los siete tratamientos de cada suelo, la segunda medición se realizó a los 44 días después del trasplante, a los 59 días para la segunda y a los 74 días para la tercera medición. Partiendo de la base del cuello de la raíz hasta la parte apical de la planta.

Diámetro del cuello de la raíz (mm)

Esta variable se midió al inicio del trasplante y a los 50 días después del trasplante a los 59 días para la segunda y a los 74 días para la tercera medición; utilizando para ello, pié de Rey digital. La medición se realizó por cada tratamiento en todos los suelos. Está expresada en mm.

Área foliar (cm²)

Esta variable se midió a los 50 días después del trasplante usando una máquina para la medición de área foliar modelo LI 3100C, tomando como referencia la última hoja bien formada de cada planta. Está representada en cm².

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados de los análisis químicos de los tres tipos de suelos utilizados en el experimento con las características de cada uno como: el pH, y los elementos que se encuentran presentes los podemos describir a continuación:

Según el análisis químico del suelo Cabuyerita (Cuadro 1), presenta un suelo franco con un pH muy ácido de 4.92, con una baja saturación de bases intercambiables de Ca, Mg y K, no suficiente para lograr un crecimiento óptimo de la mayoría de los cultivos. En cambio presenta una elevada saturación de algunos metales pesados como el Fe, Mn y Al que cuando están presentes en la solución del suelo, causan algunos daños a las plantas a nivel radicular generando dificultad para obtener algunos nutrimentos presentes en el suelo.

La fertilidad de un suelo está delimitada en gran parte por la presencia de bases intercambiables. De esta forma, la suma de las bases (Ca + Mg + K) es un cierto criterio importante para establecer el grado de fertilidad de un suelo y diagnosticar problemas de acidez (Molina s.f).

Cuadro 3.Resultados de análisis químico inicial del suelo Cabuyerita, Cauca

pH	4.92	Fe	6.31 mg/kg
Materia Orgánica	233.3 g/kg	Mn	3.62 mg/kg
K	0.09 cmol/kg	Cu	0.05 mg/kg
Ca	0.09 cmol/kg	Zn	0.80 mg/kg
Mg	0.12 cmol/kg	Arena	47.52 (%)
Al	1.5 meq	Limo	35.79 (%)
CIC	44.6 cmol/kg	Arcilla	16.69 (%)
S	499.4 cmol/kg	Textura	Franco
B	0.33 mg/kg		

Como se muestra en los resultados del análisis químico del suelo Sonora (Cuadro 2), este presenta un suelo franco arenoso con un pH muy ácido de 4.42 y bases intercambiables de K, Mg y Ca bajas pero en este suelo notamos que el Ca se encuentra en mayor proporción con 0.50 cmol/kg si lo comparamos con el suelo Cabuyerita donde se presenta muy bajo nivel de Ca con 0.09 cmol/kg. La alta disponibilidad de elementos tóxicos como Fe, Mn y Al siempre fue alto muy similar al suelo Cabuyerita.

Una causa importante de la acidez de estos suelos es el manejo intensivo de las plantaciones forestales. Donde se considera relevante la acidificación causada por la extracción de cationes como producto comercial (Ca en plantaciones de teca y eucalipto). La acidificación se inicia con la pérdida de estos cationes debido en parte a la acción de las raíces que absorben cationes y liberan iones H^+ para mantener un equilibrio en su interior, reduciendo el pH del suelo.

De los suelos evaluados este suelo de Sonora fue el que resultó como el más ácido. Según Molina (s.f) la pérdida de la cobertura vegetal y la preparación de suelo para la siembra de estos árboles, pudieron incrementar la lixiviación de cationes hacia capas inferiores y aumentar el grado de acidez del suelo.

Cuadro 4.Resultados de análisis químico inicial del suelo Sonora, Darién, Valle

pH	4.42	Fe	6.88 mg/kg
Materia Orgánica	216.4 g/kg	Mn	4.92 mg/kg
K	0.12cmol/kg	Cu	0.04 mg/kg
Ca	0.50cmol/kg	Zn	1.76 mg/kg
Mg	0.17cmol/kg	Arena	53.34 (%)
Al	1.5 meq	Limo	34.19 (%)
CIC	55.0cmol/kg	Arcilla	12.47 (%)
S	385.1cmol/kg	Textura	Franco arenoso
B	0.46 mg/kg		

Los resultados del análisis del suelo San José (Cuadro 3), muestran un suelo franco con un pH muy ácido de 4.78, una distribución de bases intercambiables muy bajas de K y Mg con respecto al Ca que fue mayor. Los elementos Fe, Mn y Al siempre estuvieron presente en el suelo en concentraciones que alteran la absorción de nutrimentos necesarios para que la planta haga su funcionamiento biológico normal.

El pH del suelo está directamente relacionado al % de saturación de acidez, ya que el Al intercambiable precipita cuando el pH es superior a 5.5. Cuando el pH está por debajo de ese valor, la solubilidad del Al se incrementa, al igual que el riesgo de causar toxicidad a las raíces. En síntesis, el diagnóstico de problemas de acidez en estos suelos forestales está fundamentado en el resultado de este análisis de suelos, cuya interpretación se realiza con base a criterios mencionados anteriormente.

Una vez aplicada la cal, como comenta Molina (s.f), se debe esperar un tiempo prudencial de un mes, para que reaccione antes de añadir algún fertilizante. El contacto directo de la cal con fertilizantes nitrogenados amoniacales en la superficie del suelo puede favorecer la formación de carbonatos de amonio, el cual a su vez se transforma en amoniaco y se pierde el N por volatilización. También el contacto con fertilizantes fosfatados causa pérdidas del elemento por formación de fosfatos de Ca.

Cuadro 5.Resultados de análisis completo inicial del suelo San José, Cauca

pH	4.78	Fe	5.06 mg/kg
Materia Orgánica	158.9 g/kg	Mn	6.26 mg/kg
K	0.09 cmol/kg	Cu	0.03 mg/kg
Ca	0.33cmol/kg	Zn	0.66 mg/kg
Mg	0.11cmol/kg	Arena	39.66 (%)
Al	1.5 meq	Limo	43.76 (%)
CIC	47.1cmol/kg	Arcilla	15.68 (%)
S	494.6cmol/kg	Textura	franco
B	0.34 mg/kg		

5.1 Respuesta del pH a la aplicación de enmiendas calcáreas en suelos ácidos de Cabuyerita, Sonora y San José.

En los tres suelos evaluados, se realizaron mediciones periódicas del pH para conocer su evolución y respuesta a la aplicación de enmiendas calcáreas obteniéndose los resultados siguientes:

Suelo 1.Cabuyerita, Cauca

Según los ANAVA (Anexo 1 y 2), al realizar las mediciones de pH a los 10 días después de la aplicación de las enmiendas, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Según el ANAVA (Anexo 3), se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para el pH medido a los 35 días después de la aplicación de enmiendas calcáreas. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de pH se encontraron con el Tratamiento 7, Tratamiento 3 y Tratamiento 6 con valores de 6.04, 6.01 y 5.97 respectivamente, siendo similares entre sí pero diferentes con el promedio del Tratamiento 1 en donde no se aplicó cal con un valor de pH mínimo de 5.49.

Según el ANAVA (Anexo 4), se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para el pH medido a los 50 días después de la aplicación de enmiendas calcáreas. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de pH se encontraron con el Tratamiento 7, con un valor de 6.31 respectivamente, siendo diferente con el promedio de pH del Tratamiento 4 en donde se aplicó CaCO_3 para la neutralización del 80 % del Al presente en el suelo.

Cuadro 6. Prueba de media para pH del suelo con los diferentes tratamientos en Cabuyerita

Tratamiento	Descripción	pH			
		10dda	20dda	35dda	50dda
1	Sin aplicación de cal	5.12 a	5.25 a	5.49 b	6.16 ab
2	CaO neutralización del 90% Al	5.16 a	5.27 a	5.88 ab	6.11 ab
3	CaO neutralización del 90% Al	5.24 a	5.38 a	6.01 a	6.21 ab
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	5.13 a	5.31 a	5.93 ab	5.89 b
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	5.14 a	5.33 a	5.88 ab	5.96 ab
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	5.14 a	5.27 a	5.97 a	6.19 ab
7	Ca(OH) neutralización del 90% Al	5.13 a	5.37 a	6.04 a	6.31 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey P> 0.05)

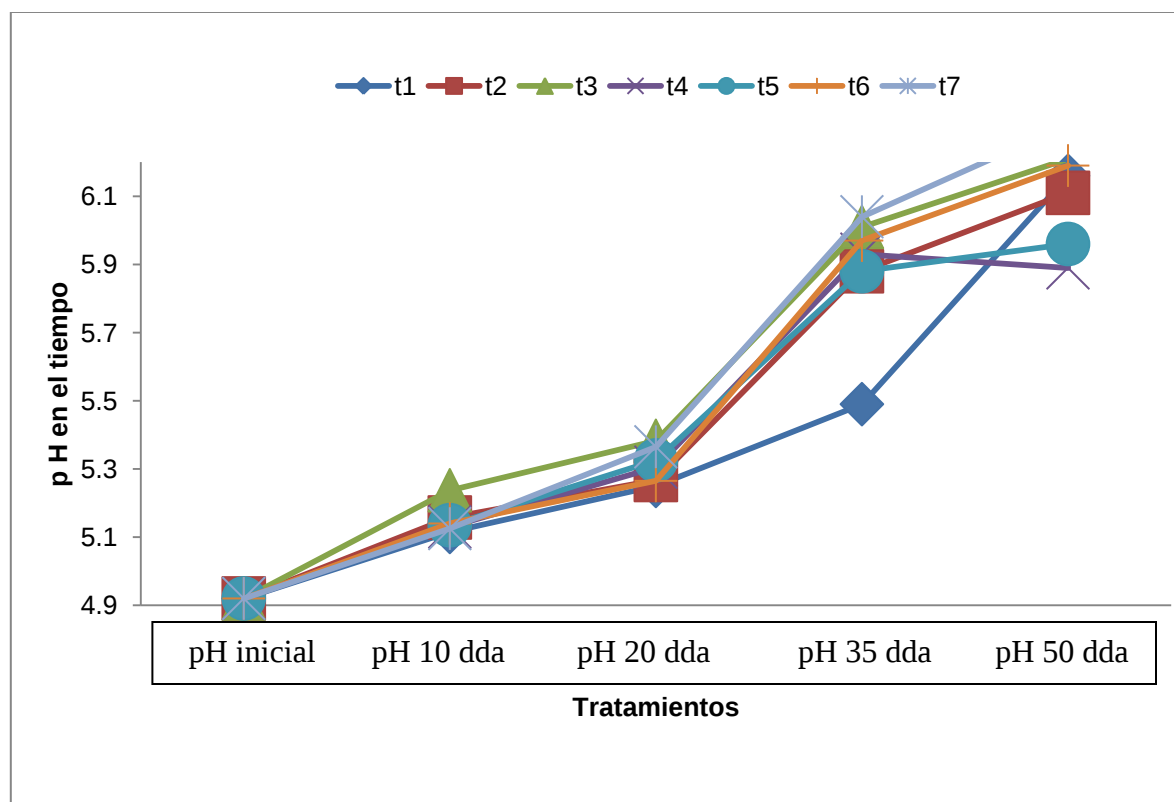


Figura 3. pH promedio del suelo con los diferentes tratamientos en Cabuyerita

Suelo 2. Sonora, Darién, Valle del Cauca

Según los ANAVA (Anexo 5, 6 y 7), al realizar las mediciones de pH a los 10, 20 y 35 días después de la aplicación de las enmiendas, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Sin embargo el ANAVA (Anexo 8), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el pH medido a los 50 días después de la aplicación de enmiendas calcáreas. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de pH se encontraron con el Tratamiento 7, Tratamiento 3 con valores de 5.82 y 5.69 respectivamente, siendo los valores mayores pero diferentes con el promedio de pH del Tratamiento 1 en donde no se aplicó cal con un valor mínimo de 5.06.

Cuadro 7. Prueba de media para pH del suelo con los diferentes tratamientos en Sonora

Tratamiento	Descripción	pH			
		10dda	20dda	35dda	50dda
1	Sin aplicación de cal	4.69 a	4.73 a	4.82 b	5.06 c
2	CaO neutralización del 80% Al	4.76 a	4.83 a	5.21 ab	5.29 bc
3	CaO neutralización del 90% Al	4.65 a	4.75 a	5.08 ab	5.69ab
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	4.73 a	4.82 a	5.18 ab	5.46 abc
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	4.66 a	4.79 a	5.05 ab	5.33 bc
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	4.57 a	4.70 a	5.13 ab	5.42 abc
7	Ca(OH) neutralización del 90% Al	4.66 a	4.80 a	5.44 a	5.82 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes.(Tukey P > 0.05)

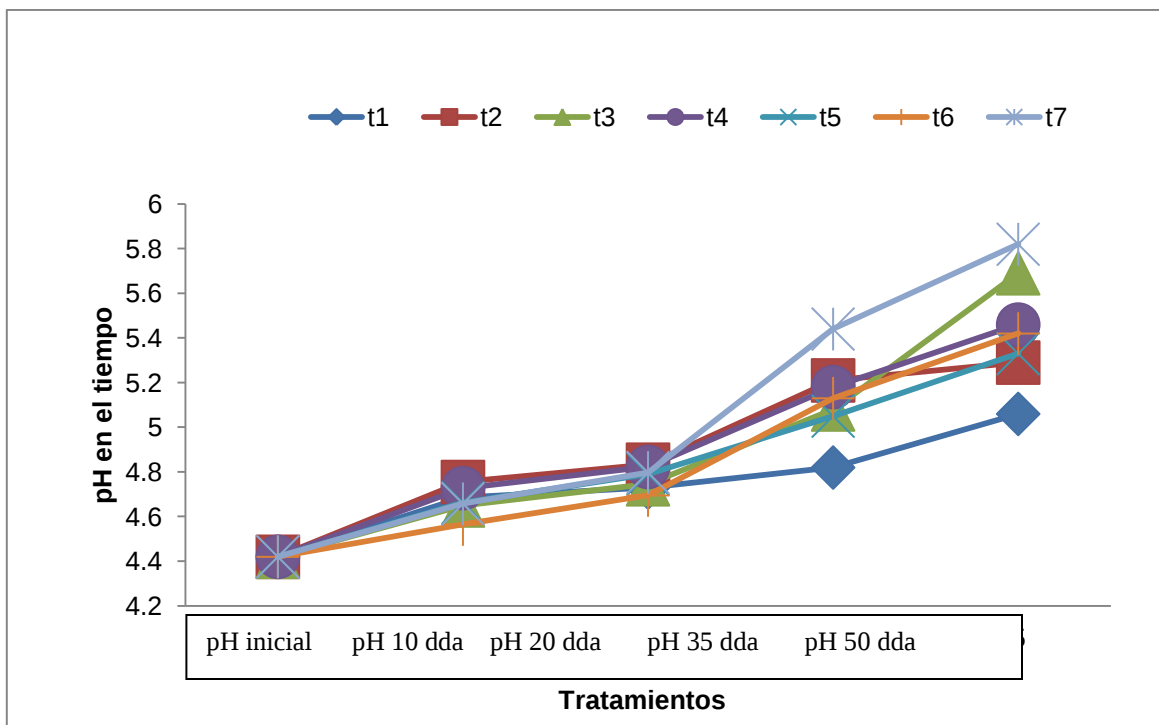


Figura 4. pH promedio del suelo con los diferentes tratamientos en Sonora

Suelo 3. San José, Cauca

Según los ANAVA (Anexo 9 y 10), al realizar las mediciones de pH a los 10, y 20 días después de la aplicación de las enmiendas, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Según el ANAVA (Anexo 11), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el pH medido a los 35 días después de la aplicación de enmiendas calcáreas. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de pH se encontraron con el Tratamiento 7, con valores de 5.67, siendo diferentes con el promedio de pH del Tratamiento 1 en donde no se aplicó cal con un valor mínimo de 5.11.

Sin embargo según el ANAVA (Anexo 12), se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos para el pH medido a los 50 días después de la aplicación de enmiendas calcáreas. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de pH se encontraron con el Tratamiento 3, Tratamiento 7 con valores de 5.72 y 5.65

respectivamente, siendo los valores mayores pero diferentes con el promedio de pH del Tratamiento 1 en donde no se aplicó cal con un valor mínimo de 5.03. Todos los tratamientos mostraron diferencias significativas en el pH con respecto al Tratamiento 1 que evitó ser el más bajo.

Cuadro 8. Prueba de media para pH del suelo con los diferentes tratamientos en San José

Tratamiento	Descripción	pH			
		10dda	20dda	35dda	50dda
1	Sin aplicación de cal	4.91 a	4.95 a	5.11b	5.03 b
2	CaO neutralización del 80% Al	4.93 a	5.03 a	5.49 ab	5.59 a
3	CaO neutralización del 90% Al	4.95 a	5.01 a	5.31 ab	5.72 a
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	4.92 a	5.02 a	5.28 ab	5.60 a
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	4.92 a	5.01 a	5.44 ab	5.45a
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	4.97 a	5.06 a	5.48 ab	5.52 a
7	Ca(OH) neutralización del 90% Al	4.85 a	4.98 a	5.67 a	5.65 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey > 0.05)

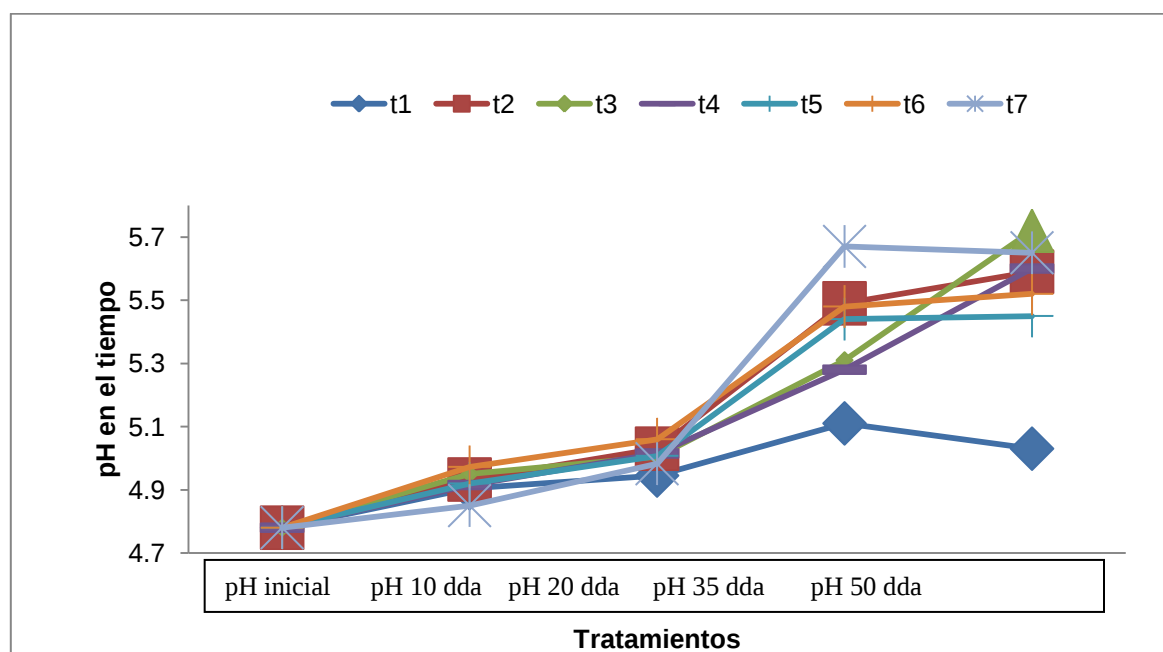


Figura 5. pH promedio del suelo con los diferentes tratamientos en San José

De acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente pudimos notar que existen dos tratamientos que se comportaron como los mejores en la reducción de acidez del suelo aumentando su pH sustancialmente en el tiempo los cuales fueron el Tratamiento 3 y el Tratamiento 7 donde se aplicó óxido de calcio e hidróxido de calcio respectivamente como enmienda ambos para neutralizar el 90% del aluminio presente en los suelos evaluados que fue de 1.5 meq para cada uno.

Las enmiendas resultantes como las mejores en los tres suelos evaluados equivalen a 800 kg/ha de óxido de calcio y 1000 kg/ha de hidróxido de calcio respectivamente como las más eficientes para estos suelos del Departamento del Valle de Cauca y el Departamento de Cauca, suelos forestales ácidos cultivados con plantas de Eucalipto.

Esto indica que al incorporar enmiendas calcáreas al suelo se da una neutralización del Al y el Fe incrementándose de esta manera los niveles de otros nutrimentos importantes que deben estar disponibles para la planta como el nivel de P. Esto coincide con lo que argumenta Espinoza (s.f) que la adición de cal a los suelos ácidos inactiva el Al y Fe, incrementando los niveles de P disponible para la planta.

Tal como nos muestran las figuras 1, 2 y 3 el pH siempre fue ascendiendo conforme el tiempo lo que representa esto como una acertada decisión el encalar los suelos ácidos para aumentar los rendimientos de nuestros cultivos. El mayor aumento de pH fue a los 35 días después de las aplicaciones de enmiendas donde la cal ya había logrado una estabilidad neutralizante en los tres suelos para hacer su mayor efecto.

Según Bernier (2006), el mayor efecto del encalado es la reducción en la solubilidad del Al y del Mn, los que son tóxicos para la mayoría de los cultivos. La aplicación de cal no produce liberación de fósforo de formas retenidas o fijadas en el suelo, o de formas insolubles. Sin embargo favorece la disponibilidad del fósforo aplicado después del encalado. La cal bloquea algunos sitios reactivos del complejo coloidal, impidiendo que

éstos atraigan los iones fosfato que están en la solución del suelo y lo retengan o fijen. De este modo queda más fósforo disponible para ser absorbido por las plantas.

Por lo general la acidez restringe la actividad de la mayoría de los microorganismos del suelo. Por el encalado se mejoran las condiciones para un adecuado desarrollo de la actividad microbiana. La fijación biológica de N es uno de los procesos que se ven favorecidos por el encalado.

En forma paralela, al mejorar las condiciones de acidez del suelo se favorece toda la actividad de las bacterias responsables de la mineralización de la materia orgánica favoreciendo la nitrificación del N orgánico y la mineralización de formas orgánicas de azufre, a formas minerales capaces de ser absorbidos por las raíces de las plantas.

La acción neutralizante de los materiales de encalado no se debe en forma directa al Ca y el Mg, sino a las bases químicas a las cuales 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, además las sales básicas se disocian y generan cationes OH^- . Posteriormente los iones ácidos en solución pueden entrar en contacto con la cal y el agua del suelo. Los OH^- generados por los carbonatos, hidróxidos y silicatos son los que neutralizan la acidez del suelo al propiciar la precipitación del Al como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y la formación de agua (Molina s.f).

5.2 Respuesta de altura de plantas de eucalipto a la aplicación de enmiendas calcáreas en suelos ácidos de Cabuyerita, Sonora y San José.

Después de haber realizado la medición periódica de las plantas para conocer su evolución y respuesta de crecimiento a la aplicación de enmiendas calcáreas en los tres suelos como Cabuyerita, Sonora y San José y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Suelo 1.Cabuyerita

Según los ANAVA (Anexo 13, 14 y 15), al realizar las mediciones de altura de planta a los 44, 59 y 74 días después del trasplante no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, en ningún tiempo de medición.

Cuadro 9.Prueba de medias para altura de plantas de eucalipto en los diferentes tratamientos en Cabuyerita

Tratamiento	Descripción	Altura de planta (cm)		
		44ddt	59ddt	74ddt
1	Sin aplicación de cal	48.50 a	58.75 a	68.5 a
2	CaO neutralización del 80% Al	49 a	61.75 a	74 a
3	CaO neutralización del 90% Al	49.25 a	60.25 a	74 a
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	46.25 a	57.75 a	71.25 a
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	51.50 a	64.25 a	76.25 a
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	48 a	60.50 a	76.25 a
7	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	43 a	63.50 a	68.13 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey> 0.05)

Suelo 2. Sonora, Cauca

Según el ANAVA (Anexo 16), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para la altura de planta medida a los 44 días después del trasplante. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de altura de planta se encontraron con el Tratamiento 6 con valores de 64 cm siendo diferente con el promedio de altura del Tratamiento 7 con un valor mínimo de crecimiento de 51.50 cm.

Según el ANAVA (Anexo 17), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para la altura medida a los 59 días después del trasplante. La prueba de Tukey indica que el promedio más alto de altura de planta se encontraron con el Tratamiento 3 con valores de

88 cm siendo los valores mayores pero diferentes con el promedio de altura del Tratamiento 7 con un valor mínimo de crecimiento de 72.25 cm.

Según el ANAVA (Anexo 18), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para la altura medida a los 74 días después del trasplante. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de altura de planta se encontraron con el Tratamiento 5, el Tratamiento 2 y el Tratamiento 6 con valores de 106.15 cm, 105.98 cm y 105.88 cm respectivamente, siendo diferentes con el promedio de altura del Tratamiento 7 con un valor mínimo de crecimiento de 83.25 cm.

Cuadro 10. Prueba de medias para altura de plantas de eucalipto en los diferentes tratamientos en Sonora

Tratamiento	Descripción	Altura de planta (cm)		
		44ddt	59ddt	74ddt
1	Sin aplicación de cal	54.25 ab	77 ab	99.7 ab
2	CaO neutralización del 80% Al	60.25 ab	84.10 ab	105.98 a
3	CaO neutralización del 90% Al	58 ab	88 a	104.63 ab
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	63.25 ab	83.03 ab	104.63 ab
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	56.75 ab	83.13 ab	106.15 a
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	64 a	85.05 ab	105.88 a
7	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	51.50 b	72.25 b	83.25 b

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey> 0.05)

Suelo 3. San José, Cauca

Según el ANAVA (Anexo 19), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para la altura medida a los 44 días después del trasplante. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos de altura de planta se encontraron con el Tratamiento 4 con valores de 57.75 cm siendo los valores mayores pero diferentes con el promedio de altura del Tratamiento 6 con un valor mínimo de crecimiento de 46.75 cm.

Según los ANAVA (Anexo 20 y 21), al realizar las mediciones de altura de planta a los 59 y 74 días después del trasplante no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. De acuerdo al comportamiento obtenido de las plantas de eucalipto con respecto al pH demuestra la tolerancia de parte de la planta a ciertos rangos de acidez. Cuando la enmienda para disminuir la acidez más eficiente fue el Tratamiento 7 para corrección del 90% del Al disponible en la solución del suelo fue donde se manifestaron las plantas de menor tamaño demostrando así que la planta se adapta mejor a pH ácidos.

Cuadro 11. Prueba de medias para altura de plantas de eucalipto en los diferentes tratamientos en San José

Tratamiento	Descripción	Altura de planta (cm)		
		44ddt	59ddt	74ddt
1	Sin aplicación de cal	52 ab	77 a	82.63 a
2	CaO neutralización del 80% Al	51.50 ab	84.50 a	91.25 a
3	CaO neutralización del 90% Al	55.75 ab	83.25 a	94.25 a
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	57.75 a	85.50 a	87 a
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	52.50ab	84.63 a	93.13 a
6	Ca (OH) ₂ neutralización 80% de Al	46.75 b	76.13 a	84.13 a
7	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	54.75 ab	82 a	86.63 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey> 0.05)

Según Molina (s.f), los mecanismos de tolerancia al Al de la planta de eucalipto son los siguientes:

Diferenciaciones morfológicas en las raíces laterales y en los ápices radiculares, que les permiten desarrollar una mejor habilidad para continuar su elongación sin sufrir daño.

Cambio de pH en la rizosfera. A través de absorciones diferenciales de iones y secreciones de ácidos orgánicos, CO₂ y bicarbonato, la planta puede cambiar la reacción de su medio inmediato de crecimiento y con esto regular la absorción de Al.

Traslocación más lenta del Al a la parte aérea de la planta. Algunas especies como el eucalipto acumulan el Al en las raíces y lo trasladan a la parte aérea más lentamente que otras plantas sensitivas.

Generalmente en las especies tolerantes, el Al de las raíces no impide la absorción y traslocación de Ca, Mg y K, como si ocurre con especies sensitivas. Se ha demostrado la existencia de antagonismos Al-Ca y Al-Mg en la zona radical.

En las variedades tolerantes al Al no se inhibe la absorción y traslocación del P en la medida en que sucede en las variedades o especies susceptibles. Además muchas especies o variedades tolerantes al Al, también toleran niveles muy bajos de P, osea existe una habilidad diferencial para absorber, transportar y utilizar el P en presencia de Al. En ciertas variedades un alto contenido de Si en la planta está asociado con la tolerancia al Al.

5.3 Respuesta del diámetro de cuello de raíz a la aplicación de enmiendas calcáreas en suelos ácidos de Cabuyerita, Sonora y San José.

Después de haber realizado la medición periódica de las plantas para conocer su evolución y respuesta de crecimiento en diámetro de cuello de raíz a la aplicación de enmiendas calcáreas en los tres suelos como Cabuyerita, Sonora y San José y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Suelo 1. Cabuyerita

Según los ANAVA (Anexo 22, 23 y 24), al realizar las mediciones de diámetro de cuello de raíz de planta a los 50, 59 y 74 días después del trasplante no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Cuadro 12. Prueba de medias para diámetro de cuello de raíz de plantas de eucalipto en Cabuyerita

Tratamiento	Descripción	Diámetro de cuello de raíz (mm)		
		50ddt	59ddt	74ddt
1	Sin aplicación de cal	3.98 a	4.78 a	5.48 a
2	CaO neutralización 80% de Al	3.66 a	4.33 a	5.08 a
3	CaO neutralización del 90% Al	3.93 a	4.68 a	5.28 a
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	4.26 a	4.83 a	5.45 a
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	4.42 a	5.08 a	5.73 a
6	Ca (OH) ₂ neutralización 80% de Al	3.80 a	4.38 a	5.25 a
7	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	3.51 a	4.33 a	5.33 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey> 0.05)

Suelo 2. Sonora, Cauca

Según el ANAVA (Anexo 25), al realizar las mediciones de diámetro de cuello de raíz de planta a los 50 días después del trasplante no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Según el ANAVA (Anexo 26), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el diámetro de cuello de raíz medida a los 59 días después del trasplante. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos diámetro de planta se encontraron con el Tratamiento 6 y el Tratamiento 4 con valores de 6.63 mm y 6.30 mm respectivamente, siendo diferentes con el promedio de diámetro del Tratamiento 7 y Tratamiento 1 con un valor mínimo de crecimiento de 4.98 mm y 5.13 respectivamente.

Según el ANAVA (Anexo 37), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el diámetro de cuello de raíz medida a los 74 días después del trasplante. La prueba de

Tukey indica que los promedios más altos diámetro de planta se encontraron con el Tratamiento 6 y el Tratamiento 4 con valores de 8.68 mm y 8.33 mm respectivamente, siendo diferentes con el promedio de diámetro del Tratamiento 7 con un valor mínimo de crecimiento de 6.48 mm.

Cuadro 13. Prueba de medias para diámetro de cuello de raíz de plantas de eucalipto en Sonora

Tratamiento	Descripción	Diámetro de cuello de raíz (mm)		
		50ddt	59ddt	74ddt
1	Sin aplicación de cal	4.09 a	5.13bc	7.15 ab
2	CaO neutralización 80% de Al	4.42 a	5.55abc	7.78 ab
3	CaO neutralización del 90% Al	5.11 a	5.88abc	7.38 ab
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	4.77 a	6.30ab	8.33 a
5	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	4.44 a	5.83abc	7.35 ab
6	Ca (OH) ₂ neutralización 80% de Al	4.75 a	6.63 a	8.68 a
7	Ca (OH) ₂ neutralización 80% de Al	4.73 a	4.98 c	6.48 b

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey > 0.05)

Suelo 3. San José, Cauca

Según los ANAVA (Anexo 28, 29 y 30), al realizar las mediciones de diámetro de cuello de raíz de planta a los 50, 59 y 74 días después del trasplante no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Cuadro 14. Prueba de medias para diámetro de cuello de raíz de plantas de eucalipto en San José

Tratamiento	Descripción	Diámetro de cuello de raíz (mm)		
		50ddt	59ddt	74ddt
1	Sin aplicación de cal	4.73 a	4.98 a	7.35 a
2	CaO neutralización 80% de Al	4.75 a	6.63 a	7.15 a
3	CaO neutralización 90% de Al	5.11 a	5.88 a	8.68 a
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	4.42 a	5.55 a	7.78 a
5	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	4.09 a	5.13 a	8.68 a
6	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	4.77 a	6.30 a	7.38 a
7	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	4.44 a	5.83 a	8.33 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey> 0.05)

El eucalipto alcanza sus mejores desarrollos en suelos limosos o algo pesados y en suelos francos y arcillas. Existen grandes diferencias entre especies, y aún variedades respecto a la susceptibilidad frente a la acidez de los suelos. Las causas por las cuales las plantas son susceptibles a la acidez son variadas. Existen efectos directos (daños por acidez propiamente dicha) y efectos indirectos. Generalmente los efectos directos son menos importantes ya que las plantas tienen resistencia a condiciones de pH bajo.

Según Zapata (2004,), la tolerancia al aluminio puede operar de diferentes maneras: 1) al prevenir o reducir su absorción por la planta, y 2) desintoxicándose una vez que éste haya penetrado en la planta. La exclusión del aluminio de la planta puede operar de varias formas. El pH de la zona radical se incrementa y causa un decrecimiento de la solubilidad del aluminio. Este proceso involucra que la planta absorba más aniones que cationes y libere hidroxilos y bicarbonatos. Este proceso se ha visto que lo utilizan algunas variedades de trigo. Las especies más tolerantes tenían una mayor capacidad de absorber nitratos que amonio.

La capacidad de intercambio catiónica radical (CICR) se ha sugerido como un mecanismo asociado a la tolerancia al Al, ya que reduce la difusión del Al^{+3} e igualmente, reduce la severidad de los efectos del aluminio en la expansión de la pared celular causando una reducción de los radicales carboxílicos libres en la pared celular, en los cuales se podría unir el Al^{+3} . Se ha sugerido alguna resistencia del plasmolema al daño por aluminio. Esto podría reducir la difusión del aluminio al citoplasma (Zapata, 2004).

Según Hecht-Buchholz y Foy (Citado por Zapata, 2004), se piensa que los cambios morfológicos son un mecanismo de tolerancia al aluminio. Han observado que se produce en mucílago alrededor de la raíz para protegerla. Estos mismos autores han observado cambios morfológicos a diferentes niveles de aluminio.

Una vez que el aluminio ha penetrado en los tejidos de la planta, empiezan a operar otros mecanismos. En ciertas especies maderables el aluminio citoplasmático es complejado por moléculas orgánicas y no afecta el metabolismo celular. Este aluminio una vez inactivado, puede permanecer en el citoplasma o ser depositado en vasos de xilemas viejos o en las paredes celulares.

La desintoxicación de aluminio por plantas de té, una de las plantas que más acumula aluminio, parece que utiliza este mecanismo ha reportado la distribución desigual del aluminio en los tejidos de las raíces y la parte aérea como un posible mecanismo de tolerancia. La capacidad de las plantas de tolerar bajas concentraciones internas de calcio, fósforo y hierro se ha sugerido como la base para tolerar el Al.

5.3 Respuesta de área foliar a la aplicación de enmiendas calcáreas en suelos ácidos de Cabuyerita, Sonora y San José.

Después de haber realizado la medición de las hojas de las plantas para conocer su crecimiento en área foliar a la aplicación de enmiendas calcáreas en los tres suelos como Cabuyerita, Sonora y San José y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Suelo 1.Cabuyerita

Según el ANAVA (Anexo 31), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el área foliar medida a los 50 días después del trasplante. La prueba de Tukey indica que los promedios más altos área de planta se encontraron con el Tratamiento 5, con valores de 40.98cm^2 , siendo diferentes con el promedio de área del Tratamiento 4 con un valor mínimo de crecimiento de 26.63 cm^2 .

Cuadro 15. Prueba de medias para área foliar de plantas de eucalipto en Cabuyerita

Tratamiento	Descripción	Área foliar (cm^2) 50ddt
1	Sin aplicación de cal	32.45 ab
2	CaO neutralización del 80% Al	38.23 ab
3	CaO neutralización del 90% Al	37.88 ab
4	CaCO_3 neutralización del 80% Al	26.63 b
5	CaCO_3 neutralización del 90% Al	40.98a
6	$\text{Ca}(\text{OH})$ neutralización del 80% Al	36.28 ab
7	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ neutralización 90% de Al	28.55 ab

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes.

Suelo 2. Sonora

Según el ANAVA (Anexo 32), no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el área foliar medida a los 50 días después del trasplante. Sin embargo se puede observar que el Tratamiento 7 resultó con una mejor área foliar comparándola con el Tratamiento 5 donde el índice de área foliar fue el menor de 29.03 cm^2 .

Cuadro 16. Prueba de medias para área foliar de plantas de eucalipto en Sonora

Tratamiento	Descripción	Área foliar (cm ²) 50ddt
1	Sin aplicación de cal	33.60a
2	CaO neutralización del 80% Al	39.43a
3	CaO neutralización del 90% Al	34.88a
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	35.83a
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	29.03a
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	34.03a
7	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	39.80a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey> 0.05)

Suelo 3. San José

Según el ANAVA (Anexo 33), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el área foliar medida a los 50 días después del trasplante. La prueba de Tukey indica que el promedio más altos área de planta se encontró con el Tratamiento 7, con un valor de 50.98 cm² respectivamente, siendo diferente con el promedio de área del Tratamiento 1 con un valor mínimo de crecimiento de 29.25 cm².

El índice de área foliar en los suelos de Sonora y San José se comportaron de manera similar mostrando para ello el Tratamiento 7 como el mejor presentando mayor área foliar en comparación con el Tratamiento 5y el Testigo respectivamente donde el crecimiento foliar fue menor. En cambio en el suelo Cabuyerita se determinó como mejor el Tratamiento 5 en comparación con el Tratamiento 4 que resultó como el de menor índice de área foliar.

Cuadro 17. Prueba de medias para área foliar de plantas de eucalipto en San José

Tratamiento	Descripción	Área foliar (cm ²) 50ddt
1	Sin aplicación de cal	29.25 b
2	CaO neutralización del 80% Al	34.63 ab
3	CaO neutralización del 90% Al	34.30 ab
4	CaCO ₃ neutralización del 80% Al	36.50 ab
5	CaCO ₃ neutralización del 90% Al	34.68 ab
6	Ca(OH) neutralización del 80% Al	41.80 ab
7	Ca (OH) ₂ neutralización 90% de Al	50.98 a

* Promedios con igual letra no son estadísticamente diferentes. (Tukey> 0.05)

La mayoría de los modelos de rendimiento de un cultivo, estiman la producción máxima de biomasa en función de la radiación fotosintéticamente activa interceptada, que el cultivo acumula a lo largo del ciclo y de la eficiencia de conversión de la energía lumínica en biomasa.

Para que un cultivo use eficientemente la radiación solar, gran parte de esta debe ser absorbida por los tejidos fotosintéticos. Las hojas, principales órganos responsables de la fotosíntesis e intercepción de luz, se desarrollan en el embrión de la semilla y en los tejidos meristemáticos del tallo. Los cultivos eficientes tienden a invertir la mayor parte de su crecimiento temprano en expandir su área foliar, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de la radiación solar.

La intercepción de la radiación solar incidente que asegura las máximas tasas de crecimiento del cultivo, se encuentra cuando el índice de área foliar (IAF) aumenta hasta el IAF crítico, que permite captar el 95% de la radiación incidente

VI. CONCLUSIONES

Los mejores Tratamientos para corrección de pH fueron el T7 para el suelo de Cabuyerita, Cauca, T7 para el suelo de Sonora, Darién, Valle que ambos corresponden a una dosis de 1000 kg de hidróxido de calcio por hectárea y el T3 para el suelo de San José, Cauca, que corresponde a 800 kg por hectárea de óxido de calcio.

El comportamiento de las plantas de eucalipto una vez evaluadas las variables de crecimiento (Altura de planta, diámetro de cuello de raíz), quedó muy evidenciado que la planta se adapta a pH ácidos. En los mejores tratamientos que corrigieron la acidez fue ahí donde se manifestaron plantas de eucalipto de menor tamaño contrario a las plantas en donde el suelo se corrigió a menor escala que fueron plantas de mayor tamaño.

Las enmiendas calcáreas respondieron favorablemente al aumento de pH en un período de tiempo aproximado de 35 días después de la aplicación donde se manifestó la disminución de acidez después de ese tiempo.

VII. RECOMENDACIONES

Seguir realizando investigaciones con enmiendas al suelo con dosis diferentes e incluir la fertilización para así determinar una dosificación óptima que además de aprovechar al máximo los nutrimentos exista un abono en fertilizante.

Realizar análisis foliares a las plantas de eucalipto ya que sabemos que es una planta que se adapta a suelos muy ácidos y saber cuáles son los nutrimentos deficientes para proporcionárselos a nivel del suelo para que la plantas los absorba.

Realizar un experimento similar utilizando una planta indicadora susceptible a suelos ácidos como por ejemplo la planta de frijol y así determinar de manera más eficiente una enmienda correctiva conforme al desarrollo que presente la planta.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

BERNIER, R. ALFARO, M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Osorno, Chile. Boletín INIA N° 151. P 9-12 19-22

BIOTEC (2010).Diseño de estrategias para la obtención de plántulas sanas de aguacate *persea americana* millen condiciones de vivero.

BRADY, N. WEIL, R. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall, New Jersey, USA.13th edition. P 960

BUCKMAN, H. 1977. Naturaleza y propiedades físicas de los suelos. La cal y sus relaciones con el suelo y la planta. New York, EE.UU. P 416-417

CASTILLO NIÑO. I984.Alvaro. Almacenamiento de grano. 2 ed. Bogotá; Ediagro. P 107

CASTRO, D. 2005. Los suelos de Colombia. (En línea). Consultado 2 may. 2011.

Disponible en

<http://www.eris.unalmed.edu.co/jiagudelhttp://www.sogeocol.com.co/documentos/05loss.pdf>

<http://web.minambiente.gov.co/biogeo/menu/biodiversidad/ecosistemas/geomapa.GIF>

<http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>

CHÁVEZ, M. 1986. La acidez y el encalado de los suelos. Dirección de Investigación y Extensión de Caña de Azúcar (DIECA). Revista Ciencia y Técnica en la Agricultura Cañera. La Habana, Cuba. No. 2. P 107-116

CIAT (Centro Internacional de Agricultura). 1980. Buenas prácticas agrícolas (BPA) en la producción de frijol. P 73-76

ESPINOSA, J Y MOLINA, E. _____. Acidez y encalado de los Suelos. Beneficios del encalado International Plant Nutrition Institute. Ecuador. P 29-34

FCIEN.____. Edafología. (En línea). Consultado 2 may. 2011. Disponible en <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Reaccion%20del%20suelo.pdf>

HANNA. 1992. Adaptación de standard methods for the Examination of water and wastewater, 18ª Ed. APA AWWA WEF

IRIARTE, R, QUIROGA, A. 1993. Uso de cal y dolomita en suelos. Toxicidad de Aluminio y manganeso. Cochabamba, Bolivia. P 10-11

JARAMILLO, D. 2004. El recurso suelo y la competitividad del sector agrario colombiano. Cátedra Pedro Gómez. Universidad Nacional de Colombia. (En línea). Consultado 2 may. 2011. Disponible en <http://www.eris.unalmed.edu.co/jiagudel>

MALAVOLTA, E. 1992. Fertilización de cafeto, guía técnica para el cultivo de café, Guatemala. ANACAFE, Instituto de la Potasa y el fósforo. p 43-57.

MINERALES DEL RECREO. Elementos secundarios y microelementos. Córdoba, Chile.

MOLINA, E. ALVARADO, A.____. Manejo de la acidez y el encalado del suelo. (En línea). Consultado 2 may. 2011. Disponible en <http://www.agro.ucr.ac.cr/resuepla/Encalado2.pdf>

MORALES, A. 2010. Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica.

NAVARRO, F G. 1985. Evaluación de 6 enmiendas cálcicas en la corrección de suelos fuertemente ácidos. Tesis Ing. Agr. La Ceiba, Honduras. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Centro Universitario Regional del Litoral Atlántico. P 1-2

SUAREZ, D. 1994. Uso de cales y fertilizantes en praderas de la zona sur. Avances de producción animal, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Instituto de Producción Animal. Valdivia, Chile. P 39-65

ZAPATA, R. 2004. La química de la acidez del suelo. Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Colombia. p 37

IX. ANEXOS

Anexo 1. Cálculos para determinar la cantidad de enmienda al suelo para cada tratamiento de la siguiente manera

Para Óxido de Calcio

1meq CaO neutraliza 1meq de Al

Según resultados del análisis de suelo.

1.5 meq de Aluminio/100 g de suelo para cada tipo de suelo por tanto:

Grado de neutralización

1.5meq Al del suelo -----100%

X -----80 %

X = 1.20meq de Al a neutralizar/100g de suelo

1.5 meq Al del suelo -----100%

X -----90 %

X = 1.35 meq de Al a neutralizar /100g de suelo

Entonces requerimos 1.20 meq de CaO para neutralizar el 80% del aluminio existente en 100 g de suelo y 1.35 meq de CaO para neutralizar el 90% del aluminio existente en 100 g de suelo.

Para determinar 1meq de CaO

PM/V x 1000 donde:

PM = Peso molecular de la cal

V = Valencia del calcio

$$56/2 \times 1000 = 56/2000 = 0.03$$

Entonces requerimos 0.03 g de CaO para neutralizar 1 meq de Aluminio.

1.20 meq de Al a neutralizar x 0.03g de CaO = 0.036g de CaO

En 100g de suelo requerimos 0.036g de CaO

100g de suelo ----- 0.036g de CaO

5000g de suelo ----- X

X = 1.8g de CaO necesarios por cada planta para neutralizar el 80% del aluminio existente en el suelo.

1.35 meq de Al a neutralizar x 0.03g de CaO = 0.0405g de CaO

En 100g de suelo requerimos 0.0405g de CaO

100g de suelo ----- 0.0405g de CaO

5000g de suelo ----- X

X = 2.02g de CaO necesarios por cada planta para neutralizar el 90% del aluminio existente en el suelo.

Para Carbonato de Calcio

1 meq CaCO_3 neutraliza 1 meq de Al

Según resultados del análisis de suelo.

1.5 meq de Aluminio /100g de suelo para cada tipo de suelo por tanto:

Grado de neutralización

1.5 meq Al del suelo -----100%

X -----80 %

X = 1.20 meq de Al a neutralizar /100g de suelo

1.5 meq Al del suelo -----100%

X -----90 %

X = 1.35 meq de Al a neutralizar /100g de suelo

Entonces requerimos 1.20 meq de CaCO_3 para neutralizar el 80% del aluminio existente en 100 g de suelo y 1.35 meq de CaCO_3 para neutralizar el 90% del aluminio existente en 100g de suelo.

Para determinar 1meq de CaCO_3

PM/V x 1000 donde:

PM = Peso molecular de la cal

V = Valencia del calcio

$$100/2 \times 1000 = 100/2000 = 0.05$$

Entonces requerimos 0.05g de CaCO_3 para neutralizar 1 meq de Aluminio.

$$1.20 \text{ meq de Al a neutralizar} \times 0.05 \text{ g de } \text{CaCO}_3 = 0.06 \text{ g de } \text{CaCO}_3$$

En 100g de suelo requerimos 0.06g de CaCO_3

100g de suelo ----- 0.06g de CaCO_3

5000g de suelo ----- X

X = 3g de CaCO_3 necesarios por cada planta para neutralizar el 80% del aluminio existente en el suelo.

$$1.35 \text{ meq de Al a neutralizar} \times 0.05 \text{ g de } \text{CaCO}_3 = 0.0675 \text{ g de } \text{CaCO}_3$$

En 100g de suelo requerimos 0.0675g de CaCO_3

100g de suelo ----- 0.0675g de CaCO_3

5000g de suelo ----- X

X = 3.38g de CaCO_3 necesarios por cada planta para neutralizar el 90% del aluminio existente en el suelo.

Para Hidróxido de Calcio

1 meq $\text{Ca}(\text{OH})_2$ neutraliza 1 meq de Al

Según resultados del análisis de suelo.

1.5 meq de Aluminio /100g de suelo para cada tipo de suelo por tanto:

Grado de neutralización

1.5 meq Al del suelo -----100%

X -----80 %

X = 1.20 meq de Al a neutralizar /100g de suelo

1.5 meq Al del suelo -----100%

X -----90 %

X = 1.35 meq de Al a neutralizar /100g de suelo

Entonces requerimos 1.20 meq de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para neutralizar el 80% del aluminio existente en 100 g de suelo y 1.35 meq de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para neutralizar el 90% del aluminio existente en 100g de suelo.

Para determinar 1meq de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

PM/V x 1000 donde:

PM = Peso molecular de la cal

V = Valencia del calcio

$$74/2 \times 1000 = 74/2000 = 0.037$$

Entonces requerimos 0.037g de Ca(OH)_2 para neutralizar 1 meq de Aluminio.

$$1.20 \text{ meq de Al a neutralizar} \times 0.037 \text{ g de } \text{Ca(OH)}_2 = 0.044 \text{ g de } \text{Ca(OH)}_2$$

En 100g de suelo requerimos 0.044g de Ca(OH)_2

100g de suelo ----- 0.044g de Ca(OH)_2

5000g de suelo ----- X

X = 2.2g de Ca(OH)_2 necesarios por cada planta para neutralizar el 80% del aluminio existente en el suelo.

$$1.35 \text{ meq de Al a neutralizar} \times 0.037 \text{ g de } \text{Ca(OH)}_2 = 0.049 \text{ g de } \text{Ca(OH)}_2$$

En 100g de suelo requerimos 0.049g de Ca(OH)_2

100g de suelo ----- 0.049g de Ca(OH)_2

5000g de suelo ----- X

X = 2.45g de Ca(OH)_2 necesarios por cada planta para neutralizar el 90% del aluminio existente en el suelo.

Anexo 2. Análisis de varianza para pH a los 10 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.04109286	0.00684881	1.54	0.2204
Repetición	3	0.02442857	0.00814286	1.84	0.1767
Error	18	0.07982143	0.00443452		
Total	27	0.14534286			

C.V. = 1.293412 R-cuad. = 0.450806

Anexo 3. Análisis de varianza para pH a los 20 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.06379286	0.01063214	2.93	0.0356
Repetición	3	0.16248571	0.05416190	14.94	<.0001
Error	18	0.06526429	0.00362579		
Total	27	0.29154286			

C.V. = 1.134289 R-cuad. = 0.776142

Anexo 4. Análisis de varianza para pH a los 35 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.83349286	0.13891548	3.52	0.0175
Repetición	3	0.42458571	0.14152857	3.59	0.0343
Error	18	0.71036429	0.03946468		
Total	27	1.96844286			

C.V. = 3.376473 R-cuad. = 0.639124

Anexo 5. Análisis de varianza para pH a los 50 dda en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.52049286	0.08674881	3.16	0.0270
Repetición	3	0.13678214	0.04559405	1.66	0.2112
Error	18	0.49459286	0.02747738		
Total	27	1.15186786			

C.V. = 2.709020 R-cuad. = 0.570617

Anexo 6. Análisis de varianza para pH a los 10 dda en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.08948571	0.01491429	1.60	0.2047
Repetición	3	0.50181071	0.16727024	17.93	<.0001
Error	18	0.16791429	0.00932857		
Total	27	0.75921071			

C.V. = 2.067401 R-cuad. = 0.778830

Anexo 7. Análisis de varianza para pH a los 20 dda en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.06238571	0.01039762	1.19	0.3560
Repetición	3	0.30655357	0.10218452	11.68	0.0002
Error	18	0.15747143	0.00874841		
Total	27	0.52641071			

C.V. = 1.959538 R-cuad. = 0.700858

Anexo 8. Análisis de varianza para pH a los 35 dda en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.84528571	0.14088095	2.37	0.0729
Repetición	3	0.01270000	0.00423333	0.07	0.9746
Error	18	1.07060000	0.05947778		
Total	27	1.92858571			

C.V. = 4.754671 R-cuad. = 0.444878

Anexo 9. Análisis de varianza para pH a los 50dda en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1.57588571	0.26264762	6.64	0.0008
Repetición	3	0.00878214	0.00292738	0.07	0.9732
Error	18	0.71214286	0.03956349		
Total	27	2.29681071			

C.V. = 3.658517 R-cuad. = 0.689943

Anexo 10. Análisis de varianza para pH a los 10 dda en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.03583571	0.00597262	0.64	0.6942
Repetición	3	0.04824286	0.01608095	1.73	0.1958
Error	18	0.16690714	0.00927262		
Total	27	0.25098571			

C.V. = 1.956920 R-cuad. = 0.334993

Anexo 11. Análisis de varianza para pH a los 20 dda en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.03139286	0.00523214	1.08	0.4121
Repetición	3	0.02381429	0.00793810	1.63	0.2167
Error	18	0.08743571	0.00485754		
Total	27	0.14264286			

C.V. = 1.392131 R-cuad. = 0.387031

Anexo 12. Análisis de varianza para pH a los 35 dda en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	0.78123571	0.13020595	3.46	0.0189
Repetición	3	0.04103929	0.01367976	0.36	0.7805
Error	18	0.67833571	0.03768532		
Total	27	1.50061071			

C.V. = 3.596135 R-cuad. = 0.547960

Anexo 13. Análisis de varianza para pH a los 50 dda en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1.26543571	0.21090595	14.19	<.0001
Repetición	3	0.03878214	0.01292738	0.87	0.4750
Error	18	0.26759286	0.01486627		
Total	27	1.57181071			

C.V. = 2.214129 R-cuad. = 0.829755

Anexo 14. Análisis de varianza para altura de planta a los 44ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	172.3571429	28.7261905	1.48	0.2417
Repetición	3	79.2857143	26.4285714	1.36	0.2872
Error	18	350.2142857	19.4563492		
Total	27	601.8571429			

C.V. = 9.203143 R-cuad. = 0.418111

Anexo 15. Análisis de varianza para altura de planta a los 59ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	135.2142857	22.5357143	1.11	0.3943
Repetición	3	270.6785714	90.2261905	4.45	0.0166
Error	18	365.0714286	20.2817460		
Total	27	770.9642857			

C.V. = 7.387154 R-cuad. = 0.526474

Anexo 16. Análisis de varianza para altura de planta a los 74ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	223.4821429	37.2470238	1.35	0.2878
Repetición	3	737.5982143	245.8660714	8.89	0.0008
Error	18	497.589286	27.643849		
Total	27	1458.669643			

C.V. = 7.322396 R-cuad. = 0.658875

Anexo 17. Análisis de varianza para altura de planta a los 44 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	503.7142857	83.9523810	3.17	0.0267
Repetición	3	30.5714286	10.1904762	0.38	0.7657
Error	18	477.428571	26.523810		
Total	27	1011.714286			

C.V. = 8.836002 R-cuad. = 0.528099

Anexo 18. Análisis de varianza para altura de planta a los 59 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	687.1635714	114.5272619	2.98	0.0336
Repetición	3	147.5728571	49.1909524	1.28	0.3115
Error	18	691.942143	38.441230		
Total	27	1526.678571			

C.V. = 7.580245 R-cuad. = 0.546766

Anexo 19. Análisis de varianza para altura de planta a los 74 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1666.438571	277.739762	3.03	0.0314
Repetición	3	588.148571	196.049524	2.14	0.1306
Error	18	1648.121429	91.562302		
Total	27	3902.708571			

C.V. = 9.431390 R-cuad. = 0.577698

Anexo 20. Análisis de varianza para altura de planta a los 44 ddt en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	303.0000000	50.5000000	2.77	0.0436
Repetición	3	66.8571429	22.2857143	1.22	0.3303
Error	18	328.1428571	18.2301587		
Total	27	698.0000000			

C.V. = 8.055998 R-cuad. = 0.529881

Anexo 21. Análisis de varianza para altura de planta a los 59 ddt en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	345.3035714	57.5505952	1.67	0.1850
Repetición	3	321.0714286	107.0238095	1.67	0.0522
Error	18	619.053571	34.391865		
Total	27	1285.428571			

C.V. = 7.164259 R-cuad. = 0.518407

Anexo 22. Análisis de varianza para altura de planta a los 74 ddt en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	485.6071429	80.9345238	2.07	0.1084
Repetición	3	307.7857143	102.5952381	2.62	0.0821
Error	18	703.964286	39.109127		
Total	27	1497.357143			

C.V. = 7.072068 R-cuad. = 0.529862

Anexo 23. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 50ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	2.48952143	0.41492024	2.12	0.1016
Repetición	3	2.38875357	0.79625119	4.06	0.0228
Error	18	3.52702143	0.19594563		
Total	27	8.40529643			

C.V. = 11.25026 R-cuad. = 0.580381

Anexo 24. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 59ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1.62857143	0.27142857	2.36	0.0736
Repetición	3	1.52392857	0.50797619	4.42	0.0170
Error	18	2.06857143	0.11492063		
Total	27	5.22107143			

C.V. = 7.262422 R-cuad. = 0.603803

Anexo 25. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 74ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1.02357143	0.17059524	0.82	0.5663
Repetición	3	3.62964286	1.20988095	5.84	0.0057
Error	18	3.72785714	0.20710317		
Total	27	8.38107143			

C.V. = 8.477981 R-cuad. = 0.555205

Anexo 26. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 50 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	2.78557143	0.46426190	2.39	0.0714
Repetición	3	0.17675714	0.05891905	0.30	0.8230
Error	18	3.50334286	0.19463016		
Total	27	6.46567143			

C.V. = 9.679309 R-cuad. = 0.458163

Anexo 27. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 59 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	8.48214286	1.41369048	5.01	0.0035
Repetición	3	1.82678571	0.60892857	2.16	0.1285
Error	18	5.08071429	0.28226190		
Total	27	15.38964286			

C.V. = 9.233974 R-cuad. = 0.669861

Anexo 28. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 74 ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	13.16928571	2.19488095	3.66	0.0149
Repetición	3	0.42678571	0.14226190	0.24	0.8692
Error	18	10.79071429	0.59948413		
Total	27	24.38678571			

C.V. = 10.20206 R-cuad. = 0.557518

Anexo 29. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 50 ddt en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1.49540000	0.24923333	1.86	0.1428
Repetición	3	0.57309643	0.19103214	1.43	0.2672
Error	18	2.40682857	0.13371270		
Total	27	4.47532500			

C.V. = 8.659976 R-cuad. = 0.462200

Anexo 30. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 59ddt en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1.59857143	0.26642857	1.51	0.2296
Repetición	3	0.23535714	0.07845238	0.45	0.7232
Error	18	3.16714286	0.17595238		
Total	27	5.00107143			

C.V. = 7.209988 R-cuad. = 0.366707

Anexo 31. Análisis de varianza para diámetro de cuello de raíz a los 74ddt en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	4.76357143	0.79392857	1.19	0.3558
Repetición	3	1.03571429	0.34523810	0.52	0.6758
Error	18	12.01928571	0.66773810		
Total	27	17.81857143			

C.V. = 12.55778 R-cuad. = 0.325463

Anexo 32. Análisis de varianza para área foliar a los 50ddt en el suelo Cabuyerita, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	687.6950000	114.6158333	3.08	0.0297
Repetición	3	89.7267857	29.9089286	0.80	0.5081
Error	18	669.990714	37.221706		
Total	27	1447.412500			

C.V. = 17.72247 R-cuad. = 0.537111

Anexo 33. Análisis de varianza para área foliar a los 50ddt en el suelo Sonora, Darién, Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	326.2950000	54.3825000	1.71	0.1759
Repetición	3	169.8582143	56.6194048	1.78	0.1869
Error	18	572.339286	31.796627		
Total	27	1068.492500			

C.V. = 16.00809 R-cuad. = 0.464349

Anexo 34 Análisis de varianza para área foliar a los 50 ddt en el suelo San José, Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tratamiento	6	1182.377143	197.062857	3.04	0.0312
Repetición	3	215.675357	71.891786	1.11	0.3716
Modelo	9	1398.052500	155.339167	2.39	0.0548
Error	18	1167.477143	64.859841		
Total	27	2565.529643			

C.V. = 21.50689 R-cuad. = 0.544937