

El aluminio en el suelo y algunas estrategias de manejo

The Aluminium in the Soil: Some Strategies for its Handling

Fabio Emilio Forero Ulloa¹; Pablo Antonio Serrano Cely² y
William Alberto Balaguera López³

Resumen

El suelo está compuesto por diversos elementos entre los que se destaca el aluminio, como un metal que, en condiciones normales, no afecta el desarrollo de las plantas, pero en suelos ácidos es un factor limitante en el crecimiento de la mayoría de especies vegetales, con una afectación cercana al 50% del área sembrada en el ámbito mundial. En Colombia cerca del 85% de los suelos son ácidos, por lo cual es necesario buscar estrategias de manejo y permitir que estos suelos sean adecuados para obtener producción agrícola, máxime si en nuestro territorio existen diversos tipos de suelos, como consecuencia de los diferentes materiales parentales que, al final, son necesarios tener en cuenta para implementar el manejo estratégico del aluminio.

Palabras clave: Suelo ácido, pH, cal.

Abstract

The soil is composed by a lot of elements, and the aluminum is one of them. The aluminum is a metal that currently does not affect the normal development of the plants, but in acid soils it is in higher concentration than the average concentration for neutral soils, and it constitutes a limiting factor in the growth of most of the plant species. This condition affects about 50% of the cultivated area worldwide. In Colombia, 85% of the soils are acidic, condition that makes that the scientists look for strategies that obtain soils conditioned for getting better agricultural purposes. It agrees with the situation that in Colombian lands there are different kinds of soils that are needed for establishing the handling strategies for the aluminum.

Key words: acid soil, pH, lime.

¹ Profesor auxiliar, GIPSO, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Correo: fabio.forero@uptc.edu.co

² Profesor auxiliar, Grupo de Investigación GIPSO, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Correo: pserranocely@gmail.com

³ Estudiante de Ingeniería Agronómica. GIA. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Correo: williambalaguera@gmail.com

Introducción

El suelo en materia agrícola, es básicamente la fuente que suministra los elementos nutrientes a la planta; esto hace que la cantidad total de un elemento allí presente, no determine por sí solo su disponibilidad para la planta, ya que en ella influyen diversos factores, como el pH, que pueden modificar la solubilidad o forma química en que se encuentra un elemento.

El estudio de las plantas cultivadas en suelos ácidos reviste gran importancia para las condiciones colombianas, dado que más del 85% del territorio nacional presenta valores de pH en el suelo por debajo de 5,5, lo cual ocasiona el incremento en la concentración de H^+ , niveles elevados de aluminio y manganeso, reducción de la concentración de cationes macronutrientes, así como la solubilidad del fósforo y del molibdeno; a su vez, causa inhibición del crecimiento radical, esto tiene como consecuencia una reducción en la toma de agua y de nutrientes (Casierra y Aguilar, 2007).

La rizosfera es una zona de gran actividad, en donde interactúan las raíces de la planta, los coloides del suelo, los microorganismos y los minerales; esta interacción es muy compleja y aún no se ha esclarecido por completo. Mediante experimentos, se ha demostrado que la rizosfera puede tener muchas diferencias en cuanto sus características microbiológicas, físicas, mineralógicas y de grado de meteorización, en comparación con el volumen restante del suelo (Casierra y Niño, 2007).

En el presente texto se hizo una revisión del aluminio en el suelo y algunas estrategias de manejo, típicas en el medio agronómico, aunque pueden generar problemas a agricultores que no utilicen asistencia técnica; además, son habilidades de manejo cotidianas en los suelos ácidos.

El aluminio en el suelo

El suelo es un sistema natural abierto y complejo,

que se forma en la superficie de la corteza terrestre, donde viven las plantas y seres vivos, con características y propiedades desarrolladas por la acción de los agentes climáticos y bióticos que actúan sobre los materiales geológicos e interactúan con el relieve y drenaje durante un período de tiempo.

Los suelos ácidos presentan altos contenidos de aluminio, manganeso e hidrógeno, elementos susceptibles de causar fitotoxicidad (Marschner, 1991). El aluminio es un metal muy abundante y el tercero en la corteza terrestre. En suelos con pH levemente ácidos o neutros, el aluminio está esencialmente bajo la forma de óxidos o aluminosilicatos (Kochian, 1995; Mattiello, et al., 2008), los cuales liberan fácilmente Al^{+3} , un ion fitotóxico que actúa sobre la acidificación del suelo (Moffat, 1999; Kochian, 1995). En suelos ácidos el aluminio es el elemento que más influye negativamente sobre la productividad de las especies vegetales, afecta cerca del 50% del área sembrada en el ámbito mundial (Kochian et al., 2004) y limitan la expansión de la productividad de estos suelos (Uexkull y Mutert, 1995), por lo cual la toxicidad del aluminio es un serio problema en la producción agrícola (Moustakas et al., 1993), con limitaciones severas en la producción vegetal.

Además, la creciente contaminación atmosférica provoca una acidificación en las precipitaciones, disminuye el pH del suelo y aumenta la disponibilidad del aluminio. Esta alta concentración de protones en el agua de lluvia aumenta, a su vez, la lixiviación de cationes básicos al incidir sobre el dosel de las hojas (Poschenrieder y Barceló, 1985; Feixa, 2001).

En suelos tropicales y subtropicales con altas precipitaciones pluviométricas, los nutrientes solubles como el calcio, magnesio, potasio y otros elementos básicos son lixiviados. Cuando la remoción de cationes básicos es mayor que su tasa de liberación por los procesos de intemperismo, el pH del suelo disminuye (Lima y Cavalli, 2001), dándose un incremento

concomitante de cationes metálicos como Al^{+3} , Fe^{+3} , Mn^{++} que pueden sufrir hidrólisis ácida (Zapata, 2004). La mineralización de la materia orgánica por microorganismos del suelo resulta en liberación de nitrato e hidrógeno y ocasionando la disminución del pH. En un pH bajo, el hidrogeno (H^+) actúa en los minerales liberando iones de aluminio (Al^{+3}) que son predominantemente retenidos por las cargas negativas de las partículas de arcilla del suelo en equilibrio, con el Al^{+3} en solución. Así mismo, la cantidad de aluminio en solución aumenta con la acidez del suelo (Lima y Cavalli, 2001).

Aproximadamente un tercio de los suelos del trópico presentan naturalmente niveles de acidez y aluminio soluble que limitan severamente el crecimiento de las especies agrícolas (Sánchez y Logan, 1992). El Al^{+3} , a la vez, es uno de los componentes más importantes de la acidez potencial de los suelos porque reacciona con agua, liberando iones H^+ . La acidez potencial debido al aluminio cambiante es observada en pH menor de 5.5. En suelos con pH por encima de 5.5, el aluminio se encuentra en formas precipitadas (Jones y Kochian, 1995; Bohnen, 1995; Lima y Cavalli, 2001).

El aluminio se hidroliza en solución, de tal modo que la especie de aluminio trivalente, Al^{+3} , predomina en condiciones ácidas ($\text{pH} < 5.5$), mientras que sus especies $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ son formadas cuando el pH aumenta (Wagatsuma y Ezo, 1985). En el pH próximo a la neutralidad, lo anterior ocurre en la fase sólida $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$; predominando en condiciones alcalinas (Lima y Cavalli, 2001). Muchos de estos cationes de aluminio monoméricos se obligan a ligandos orgánicos e inorgánicos, como PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , F, ácidos orgánicos, proteínas y lípidos (Delhaize y Ryan, 1995). Una especie de aluminio polinuclear, Al_3 , puede también ser formada cuando las soluciones de aluminio son parcialmente neutralizadas con una base fuerte (Parker y Bertsch, 1992), más su ocurrencia natural sigue siendo desconocida (Delhaize y Ryan, 1995). La acidificación es una causa de

degradación de los suelos agrícolas en el ámbito a nivel mundial (López et al., 2000); además, los suelos ácidos se distribuyen ampliamente alrededor del mundo (Von Uexküll y Mutert, 1995).

En Colombia estos suelos se ubican en la gran mayoría del territorio e imponen restricciones agronómicas, entre las cuales la toxicidad por aluminio representa una de las principales limitantes para la producción de cultivos, es donde su magnitud depende del contenido de elementos nutritivos en el suelo, especialmente magnesio y calcio; por tanto las relaciones Ca/Al , Mg/Al y $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} / \text{Al}$ resultan ser parámetros de gran importancia para determinar la posibilidad de toxicidad por aluminio. En esta última relación, se considera que el aluminio presenta condiciones de toxicidad para la planta, cuando el cociente es menor o igual que la unidad (Instituto Colombiano Agropecuario, 1992; Casierra y Aguilar, 2007).

Toxicidad del aluminio en la planta

Actualmente, la toxicidad por aluminio presenta un serio problema, ya que grandes áreas del planeta, la mayoría en zonas subtropicales o tropicales, presentan suelos ácidos de manera natural (Haug, 1984), dándose una gran disponibilidad de aluminio y una disminución en la producción vegetal (Haug, 1984; Feixa, 2001). El aluminio comúnmente llamado Al^{+3} , ha sido reconocido como el limitante principal para el crecimiento de los vegetales en suelos ácidos (Darko et al., 2003; Rithcie, 1995; Venegas, 1993).

La raíz es el órgano de absorción por excelencia; en ella se localizan la mayoría de afecciones (Schwarzerova et al., 2002) y se observan los primeros síntomas, como la disminución del crecimiento de la planta (Chang et al., 1999), antes que cualquier síntoma pase a ser evidente en la parte aérea (Foy, 1984). El aluminio altera rápidamente el patrón de crecimiento celular, como consecuencia el tejido pierde organización

(Feixa, 2001), el crecimiento longitudinal de la raíz se reduce (Fraguas, 1999; Silva et al., 2002) y se favorece el crecimiento y proliferación de las raíces laterales que, con el tiempo, también acaban inhibiendo su crecimiento. El conjunto del sistema radicular presenta un color parduzco, con raíces cortas (Ryan et al., 1992), engrosado y muy ramificados (Alam y Adams, 1979), lo cual puede conducir a deficiencias nutricionales y estrés hídrico (Degenhardt et al., 1998; Fraguas, 1999).

En la parte aérea, los síntomas son difíciles de identificar. Algunas plantas parecen tener deficiencias de Ca y Mg (Jones y Kochiam, 1995; López y Espinosa, 1995; López et al., 2006; Matiello et al., 2008), con una notoria deficiencia de fósforo (Gaume et al., 2001; Jones y Kochiam 1995); hierro (Foy, 1984; Feixa, 2001) y molibdeno (Sadzawka y Campillo, 1993). La interacción entre los elementos aluminio y fósforo no sólo se da en el suelo, sino en el interior de las células de la raíz; en la pared celular esta interacción da lugar a la formación de complejos y, principalmente, de pequeños compuestos solubles, como $Al_4(PO_3)$, reduciendo la absorción del aluminio (Zheng et al., 2005).

Varios mecanismos de tolerancia al aluminio han sido postulados (Kochiam, 1995) y pueden ser clasificados en dos grupos (Jo, 1997): mecanismos externos, en los cuales las plantas tolerantes liberan ácidos orgánicos por la raíz, generalmente citrato y malato, que ligan el aluminio y forman complejos estables que impiden la absorción por la planta (Pellet, 1995; Ryan et al., 1994) y de polipéptidos (Feixa, 2001); cambios de pH en la rizosfera (alcalinización), inducida por la raíz; inmovilización del aluminio en el apoplasto, por la modificación de las propiedades de unión al aluminio de la pared celular y permeabilidad selectiva de la membrana citoplasmática (Taylor, 1998; Feixa, 2001). Mecanismos internos, en los cuales el aluminio se absorbe hacia el interior de la planta y, consecuentemente, por la célula, donde es inactivado, ya sea por alguna enzima o aislado

al interior de la vacuola (Almeida et al., 2006), por la formación de quelatos en el citosol con ácidos orgánicos o polipéptidos, por la compartimentación en la vacuola y síntesis de isozimas tolerantes al aluminio (Taylor, 1998; Feixa, 2001).

Manejo del aluminio en el suelo

Existen tres criterios para considerar el aluminio como un problema en el suelo: (1) cuando se presentan en el suelo, valores superiores a dos $cmol_c \cdot kg^{-1}$ de suelo de aluminio intercambiable; (2) cuando el porcentaje de saturación de aluminio, en relación con los cationes intercambiables, es mayor que 25; (3) si la relación $(Ca+Mg+K)/Al$ es menor o igual a 1. En cualquiera de estos tres casos es necesaria la implementación de algún correctivo, con el fin de reducir el efecto tóxico del aluminio para la planta (Casierra y Aguilar, 2007).

Tradicionalmente la solución a este problema, ha sido la aplicación de enmiendas calizas, práctica que tiene ciertas limitaciones, respecto de su efectividad (Gallardo et al., 1995) con un gasto que es necesario solventar e incluir en los costos de producción.

Para evitar la aplicación de cal en forma masiva se utilizan estrategias como: (1) uso de especies y variedades tolerantes al aluminio; (2) proceso de encalado para reducir a niveles no tóxicos o eliminar la saturación del aluminio y aumentar los niveles de calcio y magnesio y en profundidad; 3) adición de yeso para eliminar la toxicidad del aluminio en superficie (Zapata, 2004) y adición de materia orgánica, entre otros.

El término tolerancia a la acidez hace relación a una variedad de tolerancias individuales a los factores adversos del suelo y a las interacciones que ocurren entre ellos. Se incluyen, tolerancia de las plantas a niveles altos de aluminio o manganeso y a las deficiencias de calcio, magnesio, fósforo y ciertos micro nutrientes, principalmente cinc y cobre. Igualmente, la

tolerancia a aluminio por algunas plantas, generalmente, involucra tolerancia a niveles bajos de fósforo (Sánchez y Salinas, 1983; Zapata, 2004).

La biodiversidad hace que los requerimientos nutricionales en las plantas sean diferentes, sobreviviendo algunas especies en condiciones adversas, debido a una adaptación genética a su hábitat e incluso variedades de una misma especie presentan diferencias en la absorción, translocación, acumulación y uso de los nutrientes (Otani y Ae, 1996). Estas diferencias pueden ser aprovechadas ventajosamente en el mejoramiento de plantas, teniendo en cuenta su crecimiento en condiciones específicas de fertilidad y su adaptación a la presencia de factores fitotóxicos (Fageria et al., 1996; Bahia Filho et al., 1997). Idealmente, las plantas más eficientes en el aprovechamiento de nutrientes son aquellas que, bajo determinadas condiciones nutricionales, normales o adversas, consiguen absorber, translocar, acumular y utilizar mejor el nutriente para la producción de grano y/o materia seca o verde (Barriga y Marambio, 1995; Clark, 1990; Gallardo et al., 2004).

Debido a las repercusiones económicas que provoca la contaminación de los suelos por Al^{3+} , los agricultores se han encaminado a la obtención de plantas tolerantes a este elemento y, en los últimos años, se han abordado los estudios bioquímicos y moleculares de los daños que provoca la acumulación de Al^{3+} en el interior de las células vegetales. Entre los estudios más importantes que actualmente se realizan, se encuentra el relacionado con los procesos de crecimiento y división celular, los de transducción de señales, la cinética de la toma de algunos nutrimentos y los posibles mecanismos de resistencia de las plantas para este metal (Kochian et al., 2004).

Una vez realizada la recolección del germoplasma, la caracterización y evaluación cuantitativa del potencial de producción, bajo un rango de condiciones elevadas de acidez,

toxicidad de aluminio y disponibilidad de nutrientes en el suelo, esto constituye una etapa importante en el proceso de selección de especies y variedades promisorias. De esta manera, un mejor conocimiento sobre la tolerancia diferencial de especies y variedades a las limitaciones de suelo mencionadas, puede proporcionar un significativo aporte en la utilización de extensas áreas ácidas del mundo (Sánchez y Salinas, 1983; Zapata, 2004).

Aplicar cal al suelo o encalar, como normalmente se conoce esta práctica, es una de las actividades agrícolas que mejor respuesta produce en los cultivos (Zapata, 2004). El encalado es la operación por la cual se aplica al suelo compuestos de calcio o calcio y magnesio que son capaces de reducir la acidez e incrementar el pH (López y Espinosa, 1995; Espinosa, 2003) o el proceso de adicionar cal al suelo para corregir su acidez (Zapata, 2004).

Para Espinosa (2003), los mecanismos de reacción de los materiales encalantes como carbonatos, óxidos y dolomita en el suelo, permiten la neutralización de los iones H^+ , por medio de los iones OH^- producidos al entrar en contacto la cal con el agua del suelo, siendo efectiva solamente cuando el suelo está húmedo y donde sus reacciones básicas son: $(CaCO_3 \rightarrow Ca^{++} + CO_3^- ; CO_3^{=} + H_2O \rightarrow HCO_3^- + OH^- ; HCO_3^- + H_2O \rightarrow H_2CO_3 + OH^- ; H_2CO_3 \rightarrow CO_2 \uparrow + H_2O ; H^+_{\text{solución del suelo}} + OH^- \rightarrow H_2O)$. El efecto final de la reacción es la reducción de la acidez del suelo, al convertir el exceso de H^+ en H_2O . El incremento del pH permite la precipitación del Al^{+3} , como $Al(OH)_3$ que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al^{+3} en las plantas y principal fuente de iones H^+ .

Es necesario considerar la eficiencia agronómica como la calidad de los materiales encalantes que se fundamenta en factores, tales como: pureza del material, forma química, tamaño de las partículas, poder relativo de neutralización total (Espinosa y Molina, 1999) y forma de aplicación (Zapata, 2004).

La pureza es una característica importante de los materiales de encalado que reconoce su composición química y los contaminantes presentes. La capacidad de neutralizar la acidez del suelo depende de la composición química y la pureza del material; la pureza se basa en el criterio del equivalente químico que es una medida del poder de neutralización de una cal en particular. El equivalente químico se define como la capacidad del material para neutralizar la acidez, comparado con el poder de neutralización del CaCO_3 químicamente puro, al cual se le asigna el valor de 100% (Espinosa y Molina, 1999; Halvin et al., 1999; Pinochet et al., 2005).

El óxido de magnesio constituye la forma química más eficiente para neutralizar la acidez del suelo, ya que es aproximadamente 2.5 veces más efectivo que el carbonato de calcio. Los materiales de encalado que contienen magnesio son más efectivos que aquellos que contienen calcio, debido a que el magnesio tiene menor peso molecular que el calcio (Espinosa y Molina, 1999).

La finura del material representa una medida de la velocidad de reacción de la cal (Beegle y Lingenfelter, 1996; Pinochet et al., 2005). Dado que el material calcáreo afecta un pequeño volumen de suelo alrededor de cada partícula, mientras más fino es el material, mayor es el área superficial total que está en contacto con el suelo para neutralizarlo y, por lo tanto, mayor es la velocidad de la reacción (Pinochet et al., 2005). Dada la importancia de la finura de las calces, se ha introducido el término Valor Relativo de Neutralización Total (PRNT), que es obtenido de multiplicar la eficiencia granulométrica por el equivalente químico dividido entre 100. El PRNT indica qué porcentaje de la cal, expresada por su equivalente químico, es capaz de reaccionar en un lapso de tres meses; este es el real poder de neutralización de la cal. Una cal con un PRNT de 72%, indica que el 72% del material reacciona en un plazo de tres meses y el restante 18% reaccionará posteriormente (Espinosa y Molina, 1999).

Los requerimientos de cal para la mayoría de los suelos tropicales se pueden estimar con la siguiente ecuación: $\text{CaCO}_3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1} = \text{factor} \times \text{cmol Al}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo, el factor puede ser entre 1.5 – 2.0 de acuerdo a las características del cultivo y el tipo de suelo (Espinosa, 2003; Espinosa y Molina, 1999). Sin embargo, esta forma de calcular las cantidades de cal por aplicar es inconveniente, ya que se sobreestima la cantidad de ésta, al no considerar la tolerancia de especies y variedades de plantas a la toxicidad del aluminio; además, puede inducir deficiencias de varios microelementos al elevar el pH del suelo a valores no deseados (Zapata, 2004).

El exceso de cal en el suelo genera efectos adversos a los cultivos; de ahí que se han generado diversas fórmulas matemáticas para realizar el cálculo de la cal necesaria para disminuir el nivel de saturación de aluminio en la capa superior del suelo al rango deseado, como la de Cochrane et al. (1980), citado por Sánchez y Salinas, 1983), así: $(\text{CaCO}_3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}) = 1.8 \cdot [\text{Al} - \text{RAS} (\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg}) / 100]$, donde RAS es el porcentaje crítico de saturación de aluminio requerido por el cultivo o que tolera una variedad o un sistema agrícola determinado para superar la toxicidad del aluminio, y Ca, Mg y Al son los niveles intercambiables de estos cationes, expresados en $\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo (Sánchez y Salinas 1983). El factor 1.8 asume que el suelo tiene una densidad de 1.2 y la profundidad a la cual se incorpora la cal es de 20 cm (Zapata, 2004).

Espinosa y Molina (1999) relacionan el método combinado o fórmula modificada, que expresa en términos de porcentaje de saturación de acidez y en donde se incluye el factor *f* de calidad del material encalante. Al hacer esto, la constante se disminuye a 1.5, pues quedan menos factores de eficiencia de la neutralización sin contemplar y se expresa: $(\text{CaCO}_3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}) = [1.5(\text{Al}-\text{PRS})(\text{CIC}_e)/100]$; donde Al es el porcentaje de aluminio actual y PRS es el porcentaje de saturación de Al deseado. El factor *f* es $100/\text{PRNT}$.

La incorporación de caliza en el horizonte superficial es una medida eficaz para solucionar los problemas causados por los pH excesivamente ácidos; no obstante, sus efectos sobre la acidez de los horizontes subsuperficiales son muy limitados dada su escasa solubilidad (Pavan et al. 1984). Por ello, y a menos que se localice en profundidad este material, lo cual resulta muy costoso, hay que recurrir al uso de otros materiales más solubles.

El yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es una sal relativamente soluble que constituye una importante fuente de iones de calcio y sulfato, que apenas modifica el pH de los suelos y, por tanto, no altera las cargas variables de los mismos. Su empleo en los suelos ácidos está recomendado por sus beneficiosos efectos sobre la estructura y por su acción a favor de la neutralización de los efectos fitotóxicos del Al^{3+} en los horizontes subsuperficiales (González et al., 2003), aunque sus efectos solo son notorios en algunos suelos a largo plazo.

Con la aplicación de yeso se ha visto un notable incremento en rendimiento de los cultivos susceptibles a la acidez. Su incorporación mejora el desarrollo de raíces y, de esta forma, se puede aprovechar el agua y los nutrientes del subsuelo, los cuales no eran disponibles para las plantas por la acidez de éste (Zapata, 2004; Espinosa y Molina, 1999; González et al., 2003).

La toxicidad del aluminio en el suelo se elimina por neutralización cuando se remueve de la solución del suelo el Al^{3+} , como $\text{Al}(\text{OH})_3$ que, con el yeso, se logra mediante una reacción química de precipitación (Zapata, 2004), en donde se incrementa la relación Ca/Al que favorece el desarrollo de raíces. Su acción benéfica se refuerza al incrementar la fuerza iónica de la solución del suelo y la formación de pares con el Al^{3+} que dan lugar a AlSO_4^+ y su influencia indirecta sobre la disponibilidad de los iones fosfato (González et al., 2003).

El yeso aplicado al suelo tiene un efecto reconocido sobre los iones intercambiables o

efecto negativo; el magnesio resulta desplazado por el calcio procedente del yeso (Cifu et al., 2004; González et al., 2003) y se favorece el desplazamiento del potasio intercambiable, llegando este nutriente, en algunos casos, a ser deficitario (Peregrina, 2005). El potasio es un nutriente propicio a sufrir desplazamiento y lixiviación a causa del exceso de calcio provocado por la incorporación del yeso al suelo (González et al., 2003); igual suerte corre el sodio con la aplicación del yeso agrícola.

Espinosa y Molina (1999) no disponen de criterios seguros para recomendar la aplicación de yeso, por limitación en la investigación en diferentes suelos y la complejidad de las reacciones que se dan; sin embargo, se han desarrollado diversos criterios que se ajustan principalmente a suelos tropicales viejos (ultisoles y oxisoles) y son:

$\text{Yeso t}\cdot\text{ha}^{-1} = 0.4 \times \text{CIC}_E \text{ cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1} \text{ suelo} \times 2.5$ y
 $\text{Yeso t}\cdot\text{ha}^{-1} = 0.2 \times \text{CIC}_E \text{ cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1} \text{ suelo} \times 2.5$.
Igualmente, se considera que para elevar el calcio intercambiable en el suelo en $1 \text{ meq}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ó para disminuir el Al en la misma cantidad, se debe aplicar $2.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de yeso (Espinosa y Molina, 1999). Rajj (1988), citado por Zapata (2004), sugiere la siguiente recomendación de yeso, basado en el contenido de materia orgánica del suelo, como único criterio para definir la dosis: para contenido de % de materia orgánica < 1.72, la dosis de yeso es $300 - 450 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; entre 1.72 - 3.50, aplicar $255-300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y mayor a 3.5, aplicar entre $75 -150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

La adición de materia orgánica puede reducir la fitotoxicidad por aluminio; la fracción orgánica de los suelos posee la capacidad de complejar cationes, dentro de éstos el aluminio (Vance et al., 1996). De este modo, suelos ricos en materia orgánica tienen suma importancia por la cantidad de aluminio complejado (Al-MO), mayor que sobre el aluminio intercambiable (Cambri, 2004). La materia orgánica promueve la remoción del aluminio de la solución del suelo (Hargrove y Thomas, 1981) y la formación de complejos con el carbono orgánico disuelto (Bachiega et al.,

2007), disminuyendo su disponibilidad para las plantas (Berton, 1989), pues la biodisponibilidad y el potencial tóxico de los elementos en el ambiente dependen de su especiación en la solución del suelo (Cancès et al., 2003). No obstante, el proceso de quelatación del Al^{+3} está relacionado con el grado de humificación de la materia orgánica (García-Rodeja et al., 2004).

En consecuencia, el Al^{+3} en la solución del suelo aumenta con la disminución de la materia orgánica. Por la formación del complejo Al-MO, la materia orgánica controla la actividad del Al^{+3} en la solución del suelo y también el Al^{+3} intercambiable. El complejo Al-MO pierde su carácter tóxico para los vegetales (Bartlett et al., 1972, y Hargrove et al., 1981, citados por Siqueira, 1985). Meda et al., (2002) documentaron la probabilidad de ocurrencia de quelatación organometálica con algunos extractos vegetales, posibilitando la lixiviación del Al^{+3} o causando su insolubilización.

Conclusiones

La sintomatología que presentan las especies

vegetales cultivadas en suelos con contenidos de aluminio superior a su porcentaje de tolerancia no son precisos, pudiéndose observar deficiencias de uno o varios elementos nutrientes.

Las enmiendas calcáreas y el yeso, respectivamente, tienen sus limitaciones de uso y manejo, estos deben ser tenidos en cuenta por quienes los manipulan para evitar excesos de calcio y generar deficiencias de cationes básicos como magnesio, potasio y Sodio.

La materia orgánica incorporada al suelo reviste una ayuda importante en el manejo del aluminio debido a su capacidad de formar diferentes complejos estables con él; igualmente, se debe retomar esta práctica milenaria como una ayuda complementaria frente a las enmiendas minerales.

Desde el punto de vista genético se presenta como una alternativa muy valiosa hacia el futuro, como herramienta de manejo en la obtención de plantas que se adapten a suelos ácidos y deficientes en elementos nutrientes.

Literatura Citada

- Alan, S. y W., Adams. 1979. Effects of aluminium on nutrient composition and of oat. *Journal of Plant Nutrition* 1, pp. 365-375.
- Almeida, F., M. Marini, K. Oliveira de Sousa, P., Desalma, F., Irajá, F. de Carvalho y A. Oliveira. 2006. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. *Ciencia rural*. 36(1), 272-279.
- Bahia Filho, A., R. Magnavaca, R. Schaffert y Alves, V. 1997. Identification, utilization, and economic impact of maize germplasm tolerant to low levels of phosphorus and toxic levels of exchangeable aluminum in Brazilian soils. In: *Plant-Soil Interactions at Low pH*. (ed) A.C. Moniz et al. Brazilian Soil Science Society. Brazil. pp. 59-70.
- Barriga, P., y Marambio, M. 1995. Acción genética y componentes de la variación genética del contenido y eficiencia de la utilización del fósforo en trigo. *Agro Sur* 23, pp. 30-38.
- Bachiega, F., L. Ferracciú y E. Fávero . 2007. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de Latossolo sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, 37, 110-117.
- Beegle, D y D. Lingenfelter. 1996. *Soil Acidity and Lime*. Agronomy Facts N° 3, College of Agricultural Sciences. Penn State University, University Park, P.A. USA. 284 p.
- Berton, R. 1989. Especificação iônica da solução do solo - metodologia e aplicações. In: *SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS*, 2., 1989, Piracicaba. Anais... Campinas: Fundação Cargill, pp. 17- 41.
- Bohnen, H. 1995. Acidez e calagem. In: *Princípios de fertilidade de solo*. (eds) Gianello, C., C. Bissani y M. Tedesco. (eds.). Porto Alegre : Dep. de Solos. Fac. de Agronomia. UFRGS. pp. 51-76.
- Cambri, M. 2004. Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 83 p.
- Cancès, B., M. Ponthieu, M. Castrec-Rouelle, E. Aubry, y M. F., Benedetti, 2003. Metal ions speciations in a soil and its

- solution: experimental data and model results. *Geoderma*, Amsterdam 113,641-355.
- Casierra, F y R. Niño. 2007. Solubilidad y reacción del aluminio en el suelo. *Ciencia y agricultura* 5 (2), 7 – 17.
- Casierra, F y O. Aguilar. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*. 1 (2), 246 – 257.
- Chang, Y., Y. Yamamoto y H. Matsumoto. 1999. Accumulation of aluminium in the cell wall pectin in cultured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) cells treated with a combination of aluminium and iron. *Plant Cell Environ* 22, 1009-1017.
- Cifu, M., L.Xiaonan, C. Zhihong, Z. Hengyi y M. Wanzhu. 2004. Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields o a read soil in Centrl Zhejjing. *Plant and Soil*, 265,101-109.
- Clark, R. 1990. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use, and efficiency. In: *Crops as enhancers of nutrient use*. V.C. Baligar and Duncan R.R. (Ed), Academic Press, San Diego, C.A. USA. pp. 131-209.
- Darkó, E., H. Ambrus, E. Stefanovits-Bányai, J. Fodor, F. Bakos y B. Barnabás. 2003. Aluminium toxicity, Al tolerance and oxidative stress in an Al-sensitive wheat genotype and in Al-tolerant lines developed by in vitro microspore selection. *Plant Science* 166(3), 583-591.
- Degenhardt, J., P. Larsen, y S. Howell. 1998. Aluminum resistance in the Arabidopsis mutant alr-104 is caused by an aluminum-induced increase in rhizosphere pH. *Plant Physiol* 117, 19 – 27.
- Delhaize, E. y P. Ryan. 1995. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology*. 107(2), 315-321.
- Espinosa, J. 2003. Capítulo II. Encalado de los suelos tropicales. pp. 75-84. En: *Manejo integral de la fertilidad de los suelos*. Editorial. Guadalupe Ltda. Colombia. 224 p.
- Espinosa, J y E. Molina. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Primera edición. Investigación INPOFOS educación. Ecuador. 42 p.
- Fageria, N., V. Baligar, and R.Wright. 1996. The effects of aluminum on growth and uptake of Al and P by Rice. *Pesc. Agropec. Bras* 24, 677- 682.
- Fraguas, J. 1999. Tolerância de porta-enxertos de videira ao alumínio do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 34(7), 1193-1200.
- Feixa, X. 2001. Poliaminas y tolerancia al aluminio en variedades tolerantes y sensibles de *Zea mays*. Universidad Autónoma de Barcelona. En: http://www.tdr.cesca.es/tesis_uab/available/tdx-1222103-154103//xfr1de1.pdf. 172 p.; consulta: abril 2009.
- Foy, C. 1984. Physiological effects of hydrogen, aluminium and manganese toxicities in acid soil: Soil Acidity and Liming, 2a ed. F Adams (ed). ASA.CSA-SSSA. Publisher. Madison, Wiscinsin, pp. 57-97
- Gallardo, F., F. Riquelme y J. Santander. 1995. Selección de especies y cultivares tolerantes a aluminio. *Frontera Agrícola (chile)* 3(1), 4-12.
- Gallardo, F., M.Pino y F. Borie . 2004. Tolerancia a aluminio y eficiencia en la absorcion de fosforo de cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 4(1), 41-53.
- García-Rodeja, E., J. Nóvoa, X. Pontevedra, A. Martínez-Cortízes y P. Buurman. 2004. Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *Catena*, Amsterdam, 56, 155-183.
- Gaume, A., F. Mächler y E. Frossard. 2001. Aluminum resistance in two cultivars of *Zea may* L. Root exudation of organic acids and influence of phosphorous nutrition. *Plant and Soil*, Dordrecht 234, 73-81.
- González, P., R.Ordóñez, R. Espejo, R. y F.Peregrini. 2003. Cambios en el perfil de un suelo ácido cultivado y enmendado con diversos materiales para incrementar su fertilidad. en González, P., R. Ordóñez, R. Espejo, R. y F. Peregrini. 2005. Efectos a medio plazo de la espuma de azucarería, caliza magnesiana y yeso sobre las bases intercambiables y el aluminio en el perfil de un suelo ácido. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* 7,185-189
- Halvin, J., J.Beaton, S.Tisdale y W. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to Nutrient Management. 6th Edition. Prentice Hall, New Jersey. USA. 497 p.
- Haug, A. 1984. Molecular aspects of aluminium toxicity; *CRC Critical Reviws in Plant Sciences* 1(4), 345 -373.
- Hargrove, W., G.Thomas. 1981. Extraction of aluminum from aluminum-organic matter complexes. *Soil Science Society of America Journal* 45, 151-153.
- Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos – Quinta aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. Produmedios . Bogotá. 64 p.
- Jo, J. 1997. Isolation of ALU1-P gene encoding a protein with aluminum tolerance activity from arthrobacter viscosus. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 239 (3), 835-839.
- Jones, D y L. Kochian. 1995. Aluminum inhibition of the 1,4,5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role in aluminum toxicity? *Plant Cell* 7, 1913-1922.
- Kochian, L., O. Hoekenga y M. Piñeros. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology*, Palo Alto 55, 459-493.
- Kochian, L. 1995. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant. Molec.*, 46,237-260.
- Lima, C y S. Cavalli. 2001. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. *Ciencia rural Santa María* 31(3),531 – 541.
- López, M., N. Alfonzo, A. Florentino, A y M. Pérez. 2006. Dinámica del fósforo y reducción del aluminio intercambiable en un ultisol sometido a manejo conservacionista . *Interiencia* .31(4), 293 - 299.
- López, A y J. Espinosa. 1995. Manual de nutrición y fertilización de banano. Primera edición. Instituto de potasa y el fósforo, Quito – Ecuador. 81 p.
- López, I., M. Neto, V. Ramírez y I. Herrera. 2000. Organic acids metabolism in plants: From adaptive physiology to

- transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Sci.*, 160, 1 - 13.
- Mattiello, E., M. Pereira, Z. Everaldo, M. Jocimar, J. Matiello, P. Meireles y I. Da Silva. 2008. Produção de matéria seca, crescimento radicular e absorção de cálcio, fósforo e alumínio por *coffea canephora* e *coffea arabica* sob influência da atividade do alumínio em solução. *Revista brasileira de la ciencia del suelo* 32 (1),425-434.
- Marschner, H.1991. Mechanisms of adapattion of plants to acid soil. *Plant and soil.* 134,1-20.
- Meda, A., M. Pavan, M. Miyazawa y M. Cassiolato. 2002. Plantas invasoras para melhorar a eficiência da calagem na correção da acidez subsuperficial do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26, 647-654.
- Moffat, A. 1999. Engineering plants to cope with metals. *Science* 285, pp. 369 – 370.
- Moustakas, M., G. Ouzounidou y R. Lannoye. 1993. Rapid screening for aluminum tolerance in cereals by use the chlorophyll fluorescence test. *Plant Breeding*, Berlin 111, 343-346.
- Otani, T. and Ae, N. 1996. Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status. I. Screening of crops for efficient P uptake. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 42 (11), 155-163.
- Parker, D y P. Bertsch. 1992. Formation of the "Al₁₃" tridecameric polycation under diverse synthesis conditions. *Environmental Science Technology* 26(5), 914 - 921.
- Pavan, M., F. Bingham y P. Pratt. 1984. Redistribution of Exchangeable Calcium, Magnesium and Aluminum Following Lime or Gypsum Applications to a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of America Journal* 46,1201-1207.
- Pellet, D. 1995. Organic acid exudation as an aluminum tolerance mechanism in maize. *Planta*, New York 196(4), 788 - 795.
- Peregrina, F. 2005. Valoración agronómica de residuos industriales yesíferos y calizos: Implicaciones sobre la dinámica del complejo de cambio, la disolución del suelo y la productividad en Palexerults del Oeste de España. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Madrid. ETSIA. 237 p.
- Pinochet, D., F. Ramírez y D. Domingo. 2005. Evaluación de la calidad agrícola de cuatro enmiendas calcáreas en un suelo ácido derivado de cenizas volcánicas. *Agrosur* 33(1),29-35.
- Poschenrieder, Ch y J. Barceló. 1985. La muerte de los bosques: ¿Tiene la culpa la acidez de las lluvias?. *Circular Farmac.* 286,71-80.
- Rithcie GSP. 1995. Soluble aluminium in acidic soils: principals and practicalities. *Plant Soil* 171 (1), 17-27.
- Ryan, P., E. Shaff y L. Kochian. 1992. Aluminium toxicity in root. Correlation among ionic current, ion fluxes, and root elongation in aluminium – sensitive and aluminium – tolerant wheat cultivars. *Plan Physiol.* 99, 1193-1200.
- Ryan, P., E. Delhaize y P. Randall . 1994. Characterization of Al-stimulated efflux of malate from the apices of Al-tolerant wheat roots. *Planta* 74(1), 103-110.
- Sadzawka, A., y R. Campillo. 1993. Problemática de la acidez de los suelos de la IX Región. Génesis características del proceso. *Investigación y progreso agropecuario.* 12(3), 3-8.
- Sánchez, P y J. Salinas. 1983. Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América tropical. Primera edición. Editorial Montoya y Araujo Ltda, Bogotá. 93 p.
- Sánchez, P y T. Logan. 1992. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: Lal, R. and Sanchez, P., eds. *Myths and science of soils of the tropics.* Madison, WI: Soil Science Society of America. pp. 35-46.
- Schwarzerova, K., S. Zlenkova, P.Nick y Z. Opatrn. 2002. Aluminium induced rapid changes in the microtubular cytoskeleton of tobacco cell lines. *Plan and cell physiology* 43 (2), 207-216.
- Silva, S., P. Pereyra y J. Jacob. 2002. Parâmetros morfológicos para estabelecer tolerância diferencial à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37(3),357-363.
- Siqueira, C. 1985. Calagem para plantas forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE CALAGEM E ADUBAÇÃO DE PASTAGENS, 1, Nova Odessa, SP. *Anais...*Nova Odessa, 476 p.
- Taylor, G. 1998. The physiology of aluminium tolerance. In: *Metal ions in Biological Systems* 24, 165-198.
- Uexkull, H y T. Muter. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. In: DATE, R.A. et al. *Plant-soil interactions at low pH: principles and management.* Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic pp. 5-19.
- Vance, G., F.Stevenson y F. Sikora. 1996. Environmental chemistry of aluminum-organic complexes. In: SPOSITO, G. (Ed.). *The enviromental chemistry of aluminum.* 2.ed. Flórida: Lewis Publishers, pp.169-220.
- Venegas, C. 1993. Tolerancia de los cultivos a la acidez del suelo. *Frontera Agrícola* 1 (1), 23-27.
- Von Uexküll, H.R, and E. Mutert. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant Soil* 171,1-15.
- Wagatsuma, T y Ezo, Y. 1985. Effect of pH on ionic species of aluminium in medium and on aluminium toxicity under solution culture. *Soil Sci. Plant Nutrition* 31, pp. 457-561.
- Zapata, R. 2004. Química de la acidez del suelo. Primera edición. Editorial Cargraphis, Medellín – Colombia. 207 p.
- Zheng, S., J. Yang, Y. He, X. Yu, L. Zhang, J. You y R. Shen. 2005. Matsumoto, H. Immobilization of aluminum with phosphorus in roots is associated with high aluminum resistance in buckwheat. *Plant Physiology* 138,297-303.

Fecha de Recepción: 06 de mayo de 2009

Fecha de Aceptación: 05 de junio de 2009