

Efecto del magnesio y calcio sobre algunas propiedades físicas del suelo y su respuesta a la aplicación de sales hidrosolubles y vinaza.

Resumen

El suelo del departamento del Valle del Cauca presenta arcillas y procesos de solubilización que han hecho que éstos aumenten sus niveles de magnesio y calcio los cuales, según las concentraciones y formas iónicas dominantes, causan el detrimento de las propiedades físicas de éste y presentan por ejemplo la formación de precipitados de carbonatos. En este contexto, este trabajo estudia el efecto que el magnesio y el calcio presentan sobre las propiedades del suelo, especialmente sobre las propiedades físicas, y se muestra cómo la aplicación de sales hidrosolubles y vinaza contribuyen a la disminución de los efectos nocivos que éstos producen.

Palabras clave: suelos, saturación química, magnesio, degradación física.

En el Valle del Cauca y otras regiones de Colombia, se encuentran suelos con una alta saturación de magnesio del complejo de cambio. Estos suelos presentan degradación de tipo física, química y biológica, cuya magnitud esta asociada a las condiciones que le dieron origen. En el caso de los suelos que se han desarrollado en condiciones hidromórficas se observan las condiciones de degradación más severas, y a medida que se alejan de las depresiones del paisaje cercano a los ríos, algunas mejoran, al tiempo que, la saturación de magnesio, especialmente en la parte superficial del perfil, disminuye y hace posible su manejo agropecuario.

Estos suelos se caracterizan por presentar una baja conducción de agua, son muy duros y compactos cuando están secos y muy plásticos y pegajosos cuando están húmedos. Su resistencia al impacto de las gotas de lluvia es muy baja y da lugar a poca durabilidad de estructuras agrícolas (canales, taludes y carreteras). Adicionalmente, debido a la alta saturación de magnesio, las relaciones iónicas se alteran causando desbalances nutricionales, al tiempo que se ejerce un efecto tóxico (específico) sobre las plantas.

Magnesio (Mg^{+2}) en el Suelo

Los procesos que favorecen la génesis de suelos magnesicos, frecuentes en el Valle del Cauca, resultan del comportamiento

asociado con materiales aluviales con abundancia de arcillas de predominio 2:1 aunque también se presentan las 1:1, y materiales básicos fácilmente meteorizables procedentes principalmente de la cordillera central y que hoy conforman el material parental de estos suelos, condiciones climáticas de precipitación no muy alta (inferior a 1500 mm/año) y bajo estacionalidad acentuada; si bien los regímenes de humedad pueden variar desde el ácuico hasta el ústico, las condiciones modales favorecen la síntesis de arcillas 2:1, los fenómenos de expansión-contracción, el agrietamiento pronunciado (IGAC, 1995 citado por Torrente 2003).

En el Valle del Río Cauca la naturaleza de las Arcillas 2:1 y los procesos de solubilización de los materiales parentales han causado el enriquecimiento de los suelos de las terrazas bajas con iones Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^+ que confieren características específicas al suelo según las concentraciones y formas iónicas dominantes y que en ocasiones causan detrimento de las propiedades físicas y químicas como es la formación de precipitados de carbonatos. Los procesos de disolución de cationes en el suelo en general tienen el siguiente orden: $\text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{k}^+$ (González, 1975 citado por Torrente 2003).

Jaramillo, 1976; Mantilla y León, 1971; Marín y León, 1971 citados por García, 2002 reportan que la proporción de calcio y magnesio debe tener una relación de 2-3:1 para ser considerada como adecuada, de forma que si el magnesio se encuentra en mayores concentraciones que el calcio son considerados suelos con una relación Ca/Mg invertida.

A pesar que el Mg^{+2} siempre ha sido considerado como un ión benéfico para el desarrollo de las plantas cuando se encuentra en altas concentraciones en el complejo de cambio tiene efectos negativos sobre el suelo ya que causa defloculación y dispersión de las arcillas, afecta considerablemente la estructura, la aireación y la conductividad hidráulica en forma similar al efecto causado por una alta concentración de Na^+ intercambiable (García, 1990).

El calcio (Ca^{+2}) y el magnesio (Mg^{+2}) por propósitos prácticos han sido generalmente agrupados como iones similares para mantener la estructura del suelo cuando se cuantifica sodicidad del suelo y agua de irrigación (Laboratorio de salinidad del los Estados Unidos, Staff, 1954). Sin embargo, se ha sospechado que el Mg comparado con el Ca, tiene efectos dañinos en la estructura del suelo bajo ciertas circunstancias. Por ejemplo, Quirk y Schofield, (1955) observaron que la conductividad hidráulica saturada (Ks) de Mg-saturado, en un suelo ilitico, fue mucho más baja que en un suelo con Ca-saturado. McNeal et al. (1968) observaron que la Ks era consistentemente baja en sistemas Na-Mg que en su contraparte Na-Ca (Zhang y Norton 2002).

Existen diferentes teorías sobre la forma como interactúan Mg y Na para deteriorar la estructura. Se distingue entre el efecto directo o específico del Mg-intercambiable para disminuir la estabilidad estructural, y el efecto indirecto o no específico, debido a la inhabilidad del Mg en el agua de riego para contrarrestar la acumulación de Na-intercambiable en el suelo (Curtin, Steppuhn, y Sekkes, 1994).

En algunos suelos del valle del Río Cauca, a medida que la concentración del Mg^{+2} superaba la del Ca^{+2} en el complejo de cambio, se producía un efecto desfavorable en la conductividad hidráulica. La plasticidad de los suelos saturados con iones de Na^+ y/o Mg^{+2} es mayor que la de suelos saturados con iones de Ca^{+2} , efecto que se debe a la energía de hidratación y acción dispersante de estos iones, haciendo que el porcentaje de agua contenida en el suelo sea retenida fuertemente (González, 1983 citado por García 2002).

La composición mineralógica (tipo y cantidad de arcillas) es decisiva en este tipo de suelos. La illita es más susceptible al Mg^{+2} que las montmorillonitas y caolinitas (Rengasamy et al., 1976 citado por García, 2002); la vermiculita es uno de los minerales dominantes en la fracción arcillosa de muchos suelos magnésicos del valle del río Cauca y muestra una fuerte preferencia por el Mg^{+2} cuando excede el 40% en la fase intercambiable del suelo.

La presencia de minerales fácilmente meteorizables en el suelo y de aguas freáticas superficiales favorecen los procesos de saturación de un suelo o una arcilla con Mg^{+2} . Jaramillo, 1976 citado por García 2002, reporta que suelos con predominio de montmorillonita retiene más Mg^{+2} que Ca^{+2} cuando el agua saturante tiene una alta concentración de Mg^{+2} .

Diferencias entre el Mg y el Ca.

El calcio en el suelo es originado desde los minerales desde los cuales éste se formó. Anorthita ($CaAl_2Si_2O_7$) es la más importante fuente de calcio

La diferencia de efectos de los iones de Ca^{+2} y Mg^{+2} sobre el comportamiento de las arcillas puede radicar en diferencias básicas de sus propiedades químicas. El radio iónico del Mg^{+2} es menor que el del Ca^{+2} , mientras que el potencial iónico y el número de hidratación son mayores para el Mg^{+2} que para el Ca^{+2} (Tabla 1). Un número de hidratación mayor refleja una mayor película de hidratación, el calor de hidratación es más negativo para el Mg^{+2} que para el Ca^{+2} , lo que indica una coordinación más fuerte del ión Mg^{+2} con las moléculas de agua a su alrededor (Zhang y Norton, 2002).

Tabla 1. Propiedades Químicas de Mg y Ca.

Ión	Radio Iónico (nm)	Calor de Hidratación Kcal.mol ⁻¹	Número de Hidratación Mol H ₂ O/ion	Entropía de Hidratación Cal/mol.°K	Entalpía Hidratación kJ mol ⁻¹	Electronegatividad	Potencial Iónico
Ca^{+2}	0.099	-377	8-12	50	-1592	1.00	20.20
Mg^{+2}	0.065	-456	12-14	64	-1922	1.31	30.77

aunque piroxenos y anfíboles son también comunes, pequeñas cantidades de calcio pueden ser originados de la biotita y la apatita. En suelos calcáreos de regiones áridas y semiáridas los contenidos de calcio son del 1 al 30%, predominando la forma de $CaCO_3$, la dolomita [$CaMg(CO_3)_2$] y yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Havlin et al 2005).

El contenido total de Mg en el suelo va desde 0.1% en suelos de regiones húmedas hasta 4% en suelos formados en zonas semiáridas y áridas con minerales ricos en magnesio. Suelos originados por meteorización de varios minerales con presencia de magnesio incluyen la biotita, dolomita, horblenda, olivino y serpentina. El Mg también puede ocurrir en minerales de arcilla como la clorita, illita, montmorillonita y vermiculita ésta última tiene altos contenidos de Mg haciendo aportes significativos. Cantidades sustanciales de eptonita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) y blondita ($Na_2MgSO_3 \cdot 4H_2O$) pueden presentarse en suelos de regiones áridas y semiáridas (Havlin et al 2005).

El mayor grado de hidratación del ión tiene como consecuencia mayor volumen ocupado por el mismo y mucho más alta será la carga de la partícula de arcilla. La entropía de hidratación es también más alta para el Mg^{+2} que para el Ca^{+2} , esto indica que las moléculas de agua están mejor ordenadas alrededor del Mg^{+2} que alrededor del ión Ca^{+2} , sugiriendo una interacción más fuerte entre el Mg y las moléculas de agua (Tabla 1).

Los iones presentes en la solución del suelo a través de sus campos de cargas eléctricas atraen los dipolos que forman las moléculas de agua, cubriéndose así de una determinada cantidad de agua de hidratación. La fuerza de hidratación de los dipolos de agua disminuye con la distancia en que éstos se encuentran del centro de cargas del catión y poco a poco pasan a ser moléculas de agua libre. El agua de hidratación de los cationes alcalinos y alcalinotérreos disminuye con el aumento de diámetro del átomo. La hidratación de los cationes divalentes es mayor que la de los monovalentes. A mayor agua de hidratación, menor es la fuerza de

atracción que puede ejercer un cambiador sobre un catión, resultando que el Mg^{+2} tiene mayor interacción que el Ca^{+2} (Fassbender, 1984).

La alta electronegatividad del ión Mg^{+2} en comparación con otros iones comunes en el suelo, posiblemente explique la gran actividad de este ión en solución y su baja capacidad para amortiguar y conducir energía. El potencial iónico del Mg^{+2} es bajo, resultante de su pequeño radio cristalográfico y la carga iónica que exhibe confiriendo gran capacidad de hidratación (Torrente, 2003).

Los iones Mg^{+2} y Ca^{+2} se diferencian fundamentalmente en sus efectos sobre las propiedades físicas de los suelos, tales como la agregación asociada a la estabilidad estructural. El Mg^{+2} a diferencia del Ca^{+2} tiene efectos nocivos sobre la estructura de los suelos bajo ciertas circunstancias, es el caso de la afección en suelos arcillosos tipo 2:1 con saturación de magnesio superior al 35%, características a tener en cuenta en el manejo adecuado de estos suelos.

Doble Capa Difusa (DCD)

Bohn *et al.* (1979) indican que posiblemente la propiedad química más importante de los suelos es la habilidad de intercambiar y retener iones cargados en las superficies coloidales. La neutralidad eléctrica dicta que la suma de carga de cationes intercambiables es igual a la carga negativa de un suelo a un pH dado, pero es difícil distinguir entre cationes intercambiables y solubles. La concentración real de cationes en la fase líquida cambia gradualmente de una alta concentración cerca de la superficie de las partículas, a una concentración baja en la solución lejana. Tal distribución se denomina doble capa difusa, o sea, que los iones remanentes forman una doble capa difusa alrededor de una partícula de densidad de carga reducida. El espesor de la DCD depende de la concentración de la solución y de la carga del ión.

Al incrementar la concentración de la solución se restringe la difusión de cationes desde la superficie

hacia la solución del suelo, lo cual aumenta con la difusión del anión en la dirección opuesta. El efecto de la valencia del catión proviene de la fuerte atracción que ejercen los iones de mayor carga hacia la superficie del coloide. La combinación de las dos fuerzas se conoce como de interacción neta. Si se produce una fuerza de repulsión, ésta se conoce como barrera de energía y su magnitud indica que tanto se resiste el sistema a la coagulación (Bohn *et al.*, 1979).

Para promover una coagulación o floculación efectiva en el suelo se debe reducir o remover completamente la barrera de energía. Esto se puede lograr, bien sea comprimiendo la DCD o reduciendo su carga superficial. La comprensión de la DCD requiere de la adición de sales al sistema y la reducción de la carga superficial se logra mediante coagulantes inorgánicos, como el sulfato de Al y polímeros catiónicos de elevado peso molecular. Este principio se usa en la práctica para promover la agregación de suelos dispersos por la acción de iones con efectos negativos como la presencia del Na^+ y/o Mg^{+2} (García, 1995)

Efectos del Magnesio Sobre las Propiedades Físicas de los Suelos.

Cuando el Mg^{+2} alcanza saturaciones cercanas o mayores al 40% pueden deteriorar la estructura del suelo. El efecto directo o "específico" del Mg produce la expansión extrema de la doble capa difusa en los suelos de arcillas vermiculíticas e illíticas, o inhibe la hidrólisis de las montmorillonitas y vermiculitas, con lo cual se promueven fuerzas repulsivas que desfloculan el plasma arcilloso, y desagregan la microestructura antes de que entre Na, decreciendo así las propiedades hidrológicas (Emerson y Chi, 1977; Rahman y Rowell, 1979; Rowell y Shainberg, 1979; Alperovich *et al.*, 1981; Shainberg *et al.*, 1988; Keren, 1991). El efecto indirecto o «no específico» a partir de un mecanismo de expansión extrema de las arcillas estimula la entrada de Na^+ al complejo de cambio, impidiendo la hidrólisis de estos minerales (Bohn *et al.*, 1979; Curtin *et al.*, 1998; Zhang y Norton, 1998; Cavaza *et al.*, 2002).

Efecto Específico. Algunos investigadores como Ellis y Caldwell. (1935), Russell. (1961), Mantilla y León. (1971); Panov *et al.* (1972); Gómez. (1973); Chi *et al.* (1977); Rowell y Shainberg. (1979), Gonzáles (1983), citados por García (1994), han encontrado que la alta saturación de Mg^{+2} tiene características dispersivas y causa efectos adversos sobre las propiedades de agregación de manera similar a como lo hace el Na^+ , produciendo obstrucción de poros y disminución de las propiedades de flujo de los suelos. También crea problemas al incrementar la capacidad de expansión de las arcillas y como consecuencia produce alta pegajosidad y plasticidad, haciendo que los suelos no presenten estructura, o que ésta sea masiva en algunos casos y que requieran el uso de prácticas especiales de manejo.

El efecto directo del Mg^{+2} intercambiable en la disminución de la estabilidad estructural del suelo, se ha llamado efecto específico y éste se debe a la inhabilidad del Mg^{+2} para evitar la acumulación del Na^+ intercambiable en el suelo; acción que contrarresta el Ca^{+2} . Lo anterior se explica por la alta hidratabilidad del ión Mg^{+2} , el cual ejerce un efecto mecánico separando las laminas de arcilla 2:1 de tal manera que el Na^+ pueda penetrar entre ellas, facilitando su ingreso debido a su pequeño radio iónico, mientras que en el caso del Ca^{+2} , su unión puede prevenir la penetración del Na^+ al suelo (Zhang and Norton, 1998).

El efecto específico del Mg en diversos suelos, ha mostrado que la concentración crítica de floculación de éstos incrementó con el aumento de la relación Mg/Ca en la solución en ausencia de Na^+ . La estabilidad de agregados, medida con métodos de tamizado en húmedo, es mayor para suelos saturados con Ca^{+2} que para suelos saturados con Mg^{+2} . La conductividad hidráulica saturada es mayor en sistemas con Ca^{+2} que en sistemas con Mg^{+2} , presentándose mayor concentración electrolítica en éstos últimos, lo cual origina la menor tasa de flujo. Estos resultados sugieren que el efecto específico del ión Mg^{+2} no es debido a la acumulación de Na^+ en los sitios de intercambio, ni a la concentración electrolítica

debido a la reducción de la hidrólisis de la arcilla. Este podría deberse a la fuerte interacción entre el ión Mg^{+2} y las moléculas de agua asociadas a los minerales arcillosos del suelo (Zhang and Norton, 1998).

La gran capacidad de hidratación que le confiere el ión Mg^{+2} al suelo facilita la acumulación de sodio, esto sucede cuando el sodio está presente en el ambiente, proceso que agrava la estabilidad estructural, teniendo como consecuencia la alteración importante de las características físicas, tales como un aumento de la densidad aparente y la plasticidad del suelo, cambios importantes de volumen, alta capacidad de retención de humedad y limitada disponibilidad de agua para las plantas (Torrente, 2003).

Efecto del Mg en la estructura y la porosidad del suelo.

El efecto específico del Mg^{+2} sobre la estructura del suelo puede ser explicado por dos procesos: a) la película de hidratación del Mg^{+2} es mayor que la del ión Ca^{+2} , lo que genera más expansión interlamina, que favorece la dispersión y la desagregación del suelo, b) la presencia del Mg^{+2} en la solución del suelo inhibe la hidrólisis de las arcillas y esto hace que se libere de las estructuras octaédricas del Al^{+3} por el Mg^{+2} a la solución. Como resultado la concentración electrolítica en el sistema dominado por Mg^{+2} es más baja. La menor concentración electrolítica contribuye en la dispersión y desagregación. Ambos mecanismos ocurren en arcillas esmectíticas (Shainberg *et al.*, 1988).

La alteración de la estabilidad estructural de los suelos determina los cambios en la porosidad total, así como las formas de los poros individuales y su distribución. La estructura afecta la retención y transmisión de fluidos en el suelo incluyendo la infiltración, la permeabilidad y la aireación. (Montenegro y Malagón, 1990).

El espacio poroso y la distribución del tamaño de los poros de un suelo afectan procesos, tales como

el almacenamiento y movimiento del agua y los gases, los cuales influyen sobre el crecimiento de las plantas.

El Na^+ o el Mg^{+2} pueden hacer variar la densidad aparente de un suelo al causar la dispersión de las arcillas y afectar el volumen del suelo. Las partículas dispersas se mueven y depositan en los poros del suelo disminuyendo su diámetro y ocluyéndolos, haciendo que la densidad aparente aumente (García, 1994).

La Conductividad Hidráulica del Suelo

La conductividad depende no solamente de la porosidad total sino, en forma primordial, de los tamaños de los poros conductores. Los suelos de texturas gruesas con poros grandes poseen valores de conductividad hidráulica mucho mayor que los arcillosos con poros pequeños, aunque la porosidad total de la arcilla es mayor que la del suelo arenoso (Narro, 1994).

En casi todos los suelos la conductividad hidráulica no permanece constante, debido a varios procesos químicos físicos y biológicos, la conductividad hidráulica puede cambiar a medida que el agua humedece y fluye en el suelo (Amezquita, 1991). Los cambios en la composición de la fase intercambiable y en la solución del suelo a medida que penetran aguas de diferente composición o concentración de solutos puede afectar drásticamente la conductividad hidráulica. En general la conductividad disminuye, al decrecer la concentración de electrolitos debido a los fenómenos de dispersión y expansión. El desprendimiento y migración de partículas de arcilla durante flujos prolongados puede traer como consecuencia el taponamiento de poros (Klute, 1986 citado por Torrente, 2003).

Mc Neal *et al.*, (1966) citado por Torrente, 2003, encontraron un efecto directo de Mg^{+2} intercambiable en la disminución de la conductividad hidráulica en suelos dominados por

ilita más que en suelos dominados por montmorillonita, además bajo condiciones similares la mezcla Na/Mg afecta más la conductividad de los suelos que la mezcla Na/Ca.

Rowell y Shainberg. (1979) reportaron que Mg^{+2} no tuvo efecto directo sobre la conductividad hidráulica en un suelo dominado por las arcillas montmorillonita y caolinita, cuando se lavó con soluciones de concentraciones electrolíticas $> 10 \text{ mmol L}^{-1}$, pero Mg^{+2} mostró efecto específico cuando se lavó con agua desmineralizada. Shainberg *et al.* (1988) alcanzaron una conclusión similar; de igual manera, Alperovich *et al.* (1981) reportaron que el Mg^{+2} no tuvo efecto específico sobre la conductividad hidráulica, Kh, o sobre la dispersión arcillosa en suelos calcáreos, mientras que en suelos no calcáreos sí existió efecto específico al añadir Mg^{+2} en el agua de riego. Con respecto a las arcillas caolinitas y sesquióxidos, los estudios preliminares de Zhang y Norton (1998) indican que también puede haber un efecto específico de Mg.

Gómez (1973) en Colombia reportó que los suelos con arcillas montmorilloníticas y con relación Ca:Mg invertida, tiene baja permeabilidad y su porcentaje de saturación aumenta con el agua utilizada, teniendo preponderancia el Mg^{+2} sobre el Ca^{+2} .

La conductividad hidráulica decrece con los incrementos en el porcentaje de Na^+ intercambiable y/o Mg^{+2} y con la disminución en la concentración de sales debido a la expansión y dispersión de las arcillas. El Mg^{+2} intercambiable influye disminuyendo las medidas de la conductividad hidráulica, especialmente en mollisoles, efecto observado a diversos niveles de porcentaje de sodio intercambiable PSI. (González, 2001).

La influencia de la composición mineralógica de la arcilla y la proporción en que ella interviene en la composición de los suelos, tiene importancia desde el punto de vista agrícola. Esta influencia se manifiesta a través de la relación suelo-agua-planta-

atmósfera. La magnitud con la cual las partículas de arcilla disminuyen la conductividad hidráulica depende del número de partículas, del modo como están agregadas y del tipo de arcilla. La montmorillonita tiene una capacidad mayor de retención de agua y un volumen específico mayor que la illita y por ende tiene una capacidad mayor de retención de bloqueo relativo a su paso. (Herrera, 1978).

Mc Neal et al., 1966 citados por Zhang y Norton., 2002, encontraron que los suelos más afines a los iones Na^+ y Mg^{+2} eran aquellos con alto contenido de silicatos del tipo 2:1, especialmente montmorillonita y los menos afines aquellos con alto contenido de caolinita y sesquióxidos.

La concentración electrolítica es uno de los factores que controla la conductividad hidráulica del suelo, la cual está directamente relacionada con el contenido de sales y el lavado (Mojallai y Dregne, 1986 citados por Torrente 2003), independientemente del efecto de los cationes intercambiables sobre la conductividad hidráulica del suelo.

En general, la conductividad hidráulica disminuye al reducirse la concentración de electrolitos. La expansión y la dispersión de las arcillas es respuesta a la composición de electrolitos y a su concentración en la solución del suelo o en el agua de riego, cambiando la geometría de los poros y afectando la conductividad hidráulica. (Shainberg y Letey, 1984).

Cuando la concentración de sales en el agua que percola esta por debajo del valor de floculación, la dispersión de las arcillas, el movimiento de las partículas dispersas y su acumulación en el interior de los poros causan oclusión de los mismos, siendo estos los principales mecanismos responsables de la reducción en la conductividad hidráulica (García, 1994).

La concentración crítica de floculación, CCF, es decir, la salinidad mínima en una arcilla para permanecer en un estado de coágulos y agregados, aumentó con los incrementos de la relación Mg/Ca en ausencia de Na , es decir, que se

requerirán más sales hidrosolubles para mantener la agregación en presencia de elevadas cantidades de Mg . La estabilidad de agregados, medida por el método de tamizado en húmedo, fue más grande para los suelos cálcicos que para los suelos magnésicos. La Kh fue mayor en los sistemas de Ca que en los de Mg aunque la concentración electrolítica en los sistemas de Magnesio hubiera sido mayor.

No hay un consenso general en la existencia de un efecto específico de Mg ; esto puede ser porque el efecto de Mg en el comportamiento de la arcilla (ejemplo: dispersión y floculación) depende no solamente en la mineralogía del suelo arcilloso sino también en la concentración electrolítica del suelo. Además, la presencia de Na en el sistema del suelo normalmente oculta el efecto del Mg . Yousaf *et al.* (1987) estudiaron cinco suelos áridos y concluyeron que es mayor la dispersibilidad de estos suelos en sistemas Na-Mg que en sistemas Na-Ca , lo cual fue adjudicado al gran radio de adsorción del sodio en sistemas Na-Mg . Las diferentes opiniones con respecto a la existencia de un efecto específico de Mg es causada parcialmente por las dificultades en la propia separación del efecto de Na , siendo más fácil evaluar los efectos del Mg sin la presencia de Na .

En Colombia los antecedentes del Grupo de Investigación en Magnesio de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, especialmente los de Borrero *et al.* (1998), y los de Madero *et al.* (1999), tuvieron en cuenta la información de más de 6000 perfiles de suelo, y cartografiaron la distribución del Mg intercambiable en el norte del Valle del Cauca hasta la profundidad de 120 cm. Así mismo, en la investigación de Madero *et al.* (2004), se estudiaron las relaciones Ca/Mg , en tres transeptos y 12 perfiles de suelos bajo un régimen de lluvias inferior a 1400 mm anuales y, se halló que en todos los paisajes hubo efecto específico de Mg ; para $\text{Ca}/\text{Mg} < 2$ se atenuó cuando el contenido de materia orgánica fue similar a 5% o con mineralogías caoliníticas; con mineralogías micáceas el efecto se dio desde relaciones Ca/Mg 2-3. Valores de $\text{Ca}^{+2} > 10 \text{ Cmol (+)}/\text{kg}$ y pH 7.5 inhibieron la acumulación de Na^+ .

Bibliografía

- ALPEROVITCH, N., SHAINBERG, I. y KEREN, R. (1981). Specific effect of magnesium on the hydraulic conductivity of sodic soils. *J. Soil Sci.* 32:543-554.
- AMEZQUITA, E. (1991). Procesos dinámicos del suelo y nutrición vegetal. XXI Congreso Annual y 1er. Simposio Nacional sobre fisiología de la nutrición mineral Comalí, Manizales Colombia.
- BOHN, H., MCNEAL, B., O'CONNOR, G. (1979). *Soil Chemistry*. New York: Wiley. p. 330.
- BORRERO J, GARCÍA A. y GÓMEZ C. A. (1998). Suelos afectados por magnesio en el Valle del río Cauca. *Suelos Ecuatoriales*. Santa fe de Bogotá. SCCS. Vol. 28, p.104.
- CAVAZA, L., PETRUNO, A. y CIRILLO, E. (2002). Soil traits and structure stability in artificially sodicated soils. *Ital. J. Agron.*, 6, 1, pp. 15-25.
- CURTIN, D.; SELLES, F. y STEPPUHN, H. (1998). Estimating calcium-magnesium selectivity in smectitic soils from organic matter and texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, Issue 5, pp. 1280-1285.
- CURTIN, D., STEPPUHN, H. y SEKKES, F. (1994). Effects of magnesium on selectivity and structural stability or sodium soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, pp. 730-737.
- EMERSON, W.W., y CHI, C. L. (1977). Exchangeable calcium, magnesium, and sodium and the dispersion of illite in water. II. Dispersion of illite in water. *Aust. J. Soil Res.* 15, pp. 255-262.
- FASSBENDER, H. W. (1984). Dinámica de los suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. Costa Rica. p. 398.
- GARCÍA O. A., (2002). Estudios básicos sobre los suelos afectados por una alta saturación de magnesio intercambiable en el Valle del Río Cauca. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. p. 5.
- GARCÍA, O. A., (1995). Efecto de la concentración de electrolitos en el agua de riego sobre la recuperación se suelos sodicos. *Memorias VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo*. Bucaramanga. Octubre 5-8. 1994. *Suelos Ecuatoriales*. Vol. 24, pp. 33-36.
- GARCÍA O, A. (1994). Diagnostico y control de la fertilidad de los suelos afectados por sales y sodio. *Fertilidad de suelos*. SCCS. Santa fe de Bogotá. p. 469-505.
- GARCÍA O, A. (1990). Análisis de Salinidad y Aguas para riego. *Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riegos*. SCCS. Ed. Francisco Silva. Santa fe de Bogotá. p. 247-272.
- GÓMEZ, J. J. (1973). Efecto de la relación Ca:Mg invertida sobre el porcentaje de saturación y la conductividad hidráulica. Chapingo, México. p14.
- GONZÁLEZ, A. (2001). Evaluación de la dinámica y los efectos de los bicarbonatos de las aguas de riego sobre las propiedades de los suelos de áreas del valle del Cauca y Tolima. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Postgrados Sede Palmira. Tesis Doctoral.
- HAVLIN, J.L., BEATON, J.D.; TISDALE, S.L. y NELSON, W. L. (2005). *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. Upper Saddle River, New Jersey. p520.
- HERRERA, M. T. (1978). Método para estimar la conductividad hidráulica. Tesis I.A. Escuela Nacional de Agricultura Chapingo, México. Memorando técnico No. 3736. 109 p.
- KEREN, R. (1991). Specific effect of magnesium on soil erosion and water infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, pp. 783-787.
- MONTENEGRO H., Y MALAGÓN D. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. IGAC. Subdirección Agrológica. Santa fe de Bogotá, D. E. 813p.
- NARRO, F. E. (1994). *Física de Suelos con enfoque agrícola*. Editorial Trillas. México. p. 195.
- RAHMAN, W.A., ROWELL, D. L. (1979). The influence of magnesium in saline and sodic soils: a specific effect or a problem of cation exchange? *J. Soil Sci.* 30, pp. 535-546.
- ROWELL, D.L., and SHAINBERG, I. (1979). The influence of magnesium and easily weathered minerals on hydraulic conductivity changes in a sodic soil. *J. Soil Sci.* 30, pp. 719-726.
- SHAINBERG, I., ALPEROVITCH, N. y KEREN, R. (1988). Effect of magnesium on the hydraulic conductivity of Na-smectite-sand mixtures. *Clays Minner.* 36, pp. 231-236. Tokio, Japan.
- SHAINBERG, I. and J. LETEY. (1984). Response of soil to sodic and saline conditions: Effect of exchangeable magnesium and soil amendments on the response of soils to leaching with distilled water. *Hilgardia*, University of California. 52(2), pp. 29-30.
- TORRENTE, A. (2003). Condiciones hidrofísicas de suelos con alta saturación de magnesio en Valle del Río Cauca, Colombia. *Acta Agronómica.* 52 (1-4), pp. 29-37.
- ZHANG, X. C.; NORTON, L. D. (1998). Specific effect of Mg on hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation. *Soil Sci Soc Am J.* (Submitted).