EFECTO DE ALTAS SATURACIONES DE Mg^{+2} y Ca^{+2} EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO DEL VALLE DEL CAUCA

ANDRES JOSE ARISTIZABAL ARBOLEDA

7005002

UNIVERSIDAD NACIONA DE COLOMBIA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

COORDINACION GENERAL DE POSGRADOS

PALMIRA

2009

EFECTO DE ALTAS SATURACIONES DE Mg^{+2} y Ca^{+2} EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO DEL VALLE DEL CAUCA

ANDRES JOSE ARISTIZABAL ARBOLEDA

7005002

Trabajo de grado para optar al título de Magister en CIENCIAS AGRARIAS énfasis SUELOS

DIRIGIDO POR:

Ph.D. EDGAR ENRIQUE MADERO MORALES

UNIVERSIDAD NACIONA DE COLOMBIA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADOS

PALMIRA

2009

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE PALMIRA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ACTA DE JURADO DE TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS
LINEA DE INVESTIGACIÓN SUELOS

En Palmira a los 07 días del mes de Diciembre de 2009, se reunió en esta Sede el Jurado Calificador de Tesis, integrado por los doctores JUAN CARLOS MENJIVAR FLORES y ALVARO GARCIA

Para calificar la Tesis de Grado de:

ANDRES JOSE ARISTIZABAL ARBOLEDA

Titulada:

"EFECTOS DE ALTAS SATURACIONES DE Mg^{++} Y Ca^{++} EN LAS PROPIEDADES FISICAS DE UN SUELO DEL VALE DEL CAUCA" bajo la dirección del profesor Edgar Madero Morales, Ph.D.

Después de oír el informe del jurado evaluador compuesto por los docentes JUAN CARLOS MENJIVAR FLORES y ALVARO GARCIA, y de haber cumplido con el proceso de evaluación, la tesis fue calificada como:

APROBADA X

REPROBADA ____

JUAN CARLOS MENJIVAR F.

ALVARO GARCIA

Dedicatoria

Dedico a Dios por darme el regalo de la vida, y a toda mi familia por su amor incondicional y su apoyo constante en todos los momentos importantes de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Mis mas sinceros agradecimientos al Profe Edgar Madero por su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo, a los Doctores Álvaro García y Juan Carlos Menjivar, jurados de sustentación.

A Miguelito por su paciencia y ayuda constante en el laboratorio de física de suelos.

A luis H y Pablo Gallo por todo el tiempo que nos hacen perder en esas tardes de tinto y tertulia en el laboratorio de micro, y a todas aquellas personas que de alguna forma participaron en la elaboración de este trabajo, mil gracias.

La facultad y los jurados de tesis

no se harán responsables de la ideas

emitidas por el autor.

Articulo 24, Resolución 04 de 1974.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 16

1. OBJETIVOS. 19

1.1 Objetivo general 19

1.2 Objetivos específicos 19

2. MARCO TEÓRICO. 20

2.1 MAGNESIO EN EL SUELO 20

2.2 DIFERENCIAS ENTRE EL Magnesio y el Calcio 21

2.3 EFECTOS DEL Mg^{+2} SOBRE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS SUELOS 22

2.4 EFECTO DEL Mg^{+2} EN LA ESTRUCTURA Y LA POROSIDAD DEL SUELO 24

2.5 CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DEL SUELO 25

2.6 DOBLE CAPA DIFUSA (DCD) 29

2.7 VINAZA 30

2.7.1 Composición química de la vinaza. 31

2.7.2 Efecto del Sulfato de Ca^{+2} en la recuperación de suelos dispersos y expandidos. 35

3. METODOLOGÍA.....37

3.1 Localización 37

3.2 Caracterización Inicial de los Suelos 37

3.3 Preparación de Columnas 38

3.4 Preparación de las soluciones a aplicar.....39

3.5 Análisis de Efluentes.....40

3.6 Caracterización Final 41

3.7 Manejo de la Información.....41

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....42

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS.....42

4.1.1 Caracterización química inicial. 42

4.1.2 Caracterización física Inicial. 43

4.2 EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS 46

4.2.1 Propiedades Químicas después de saturar con Cl_2Mg o Cl_2Ca. 46

4.2.2 Propiedades físicas después de saturar con $MgCl_2$ y $CaCl_{2.}$ 48

4.3 EFECTO DEL LAVADO CON SOLUCIONES DE $MgSO_4$ y $CaSO_4$.....52

4.3.1 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el Efluente. 52

4.3.2 Cambios físicos en los suelos 56

4.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS FINALES DE LOS SUELOS 80

4.4.1 Horizonte A 80

4.4.2 Horizonte B 82

5. CONCLUSIONES 84

BIBLIOGRAFÍA 86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades Químicas de Mg^{+2} y Ca^{+2}. 21

Tabla 2 Composición química de las vinazas 31

Tabla 3 Características de las vinazas de 55% y 10% de sólidos totales. 32

Tabla 4 Cantidades necesarias para preparar un litro de solución en las diferentes concentraciones electrolíticas estudiadas.....40

Tabla 5 Algunas características químicas iniciales de los horizontes en estudio ..43

Tabla 6 Algunas características físicas iniciales de los horizontes en estudio.....45

Tabla 7 Algunas propiedades químicas de los horizontes estudiados después de la saturación con Mg^{+2} y Ca^{+2} 48

Tabla 8 Algunas propiedades físicas de los horizontes estudiados de la saturación con Cl_2Mg o Cl_2Ca 51

Tabla 9 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte A Magnésico 54

Tabla 10 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte A Cálcico.....54

Tabla 11 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte B Magnésico 56

Tabla 12 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte B Cálcico.....56

Tabla 13 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en el porcentaje de transmitancia y el coeficiente de dispersión de arcillas del horizonte A Magnésico y Cálcico.....58

Tabla 14 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en el porcentaje de transmitancia y el coeficiente de dispersión de arcillas del horizonte B Magnésico y Cálcico.....59

Tabla 15 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la plasticidad del horizonte A Magnésico o Cálcico 66

Tabla 16 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la plasticidad del horizonte B Magnésico o Cálcico 67

Tabla 17 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Horizonte A Magnésico 69

Tabla 18 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Horizonte A Cálcico.....69

Tabla 19 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del horizonte B Magnésico.....71

Tabla 20 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Hzt B Cálcico.....71

Tabla 21 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte A Magnésico o Cálcico.....75

Tabla 22 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte B Magnésico o Cálcico.....78

Tabla 23 Características químicas finales del horizonte A Magnésico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica 81

Tabla 24 Características químicas finales del horizonte A Cálcico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica 81

Tabla 25 Características químicas del horizonte B Magnésico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica 82

Tabla 26 Características químicas del horizonte B Cálcico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica 83

LISTA DE FIGURAS

Fígura 1 Concentración de Mg^{++} y Ca^{++}en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte A Magnésico (Izq) y Cálcico (Der) 53

Fígura 2 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte B Magnésico (Izq) y Cálcico (Der) 55

Fígura 3 Efecto del lavado con aguas de diferente concentración electrolítica y tipo de sal, SO_4Mg (Izq) y SO_4Ca (Der) en la capacidad de retención de humedad del Hzt A Magnésico (arriba) y Cálcico (abajo).....63

Fígura 4 Efecto del lavado con aguas de diferente concentración electrolítica y tipo de sal, SO_4Mg (Izq) y SO_4Ca (Der) en la capacidad de retención de humedad del Hzt B Magnésico (arriba) y Cálcico (abajo).....64

Fígura 5 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Hzt A Magnésico (Izquierda) o Cálcico (Derecha).....70

Fígura 6 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Hzt B Magnésico (Izquierda) o Cálcico (Derecha).....72

Fígura 7 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte A Magnésico (Arriba) o Cálcico (Abajo) 76

Fígura 8 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte B Magnésico (Arriba) o Cálcico (Abajo) 79

RESUMEN

Existen diversas opiniones en relación al efecto específico del magnesio en las propiedades físicas y químicas del suelo. Se ha sugerido entonces que el Mg^{+2}, comparado con el Ca^{+2}, reduce la conductividad hidráulica saturada (Ks) al promover la hinchazón de la arcilla, y la desagregación, mediante la dispersión de los coloides dentro del agregado. Dos capas de un suelo (Udenthic Haplustoll, francoso fino/Francoso/fino) de terrazas medias, se empacaron en columnas y posteriormente fueron lavados por separado con soluciones de Mg^{+2} y Ca^{+2} en concentraciones de 250, posteriormente se lavaron a concentraciones sucesivas de 50,10, 2, 0.5 y 0 mM. Se determinó la Conductividad hidráulica saturada (Ks) en los sistemas de Mg^{+2} y de Ca^{+2}, la estabilidad de agregados, el diámetro medio ponderado (DMP) y el Índice de estabilidad estructural (IE) se determinó por tamizado en agua, capacidad de retención de humedad con las ollas de presión, consistencia del suelo (límites de Atterberg), porcentaje de transmitancia (%T), y dispersión de Arcillas. Se encontró un efecto específico del Mg^{+2}, comparado con el Ca^{+2}, sobre la estabilidad estructural, la dispersión de acillas y la conductividad hidráulica (Ks) para los dos horizontes estudiados. La reducción de la Ks fue mayor cuando los horizontes fueron saturados con Mg^{+2}. Básicamente el mayor efecto negativo del Mg^{+2} sobre la estabilidad estructural y la conductividad hidráulica es debido a su mayor energía de hidratación y a su mayor radio de hidratación, produciendo más expansión (hinchamiento) de las arcillas. La dispersión de arcillas con su posterior obstrucción de poros es el proceso que en mayor medida reduce la conductividad Ks, es la disminución del tamaño de poros producto de la expansión de arcillas y la desagregación. El aumento de la concentración electrolítica del agua aplicada en las columnas de suelo mejora la conductividad hidráulica como producto de la agregación de partículas por la contracción de la doble capa difusa disminuyendo los procesos de dispersión de arcillas. Ambos horizontes al ser tratados con aguas de concentración electrolítica superior o igual a 10 mM presentaron un aumento significativo de la Ks debido posiblemente a procesos de agregación de arcillas mencionados anteriormente, dicho proceso se ve favorecido por la disminución del taponamiento de poros el cual es originado por la expansión y posterior dispersión de las arcillas. La capacidad de retención de humedad de los horizontes disminuyó al aumentar la concentración electrolítica del agua aplicada.

Palabras claves: Conductividad hidráulica; Estabilidad de agregados; Dispersión de arcillas; Mg^{+2} intercambiable.

SUMMARY

There are different views concerning the specific effect of magnesium on the physical and chemical properties of soil. It has been suggested that Mg^{+2} then compared to Ca^{+2}, reduced saturated hydraulic conductivity (Ks) to promote the swelling of clay, and unbundling, through diffusion of colloids in the aggregate. Two layers of soil (Udenthic Haplustoll, Françoso fine / Françoso / thin) of middle terraces, were packed in columns and then were washed separately with solutions of Mg^{+2} and Ca^{+2} concentrations of 250, 50,10, 2, 0.5 and 0 mM. We determined the saturated hydraulic conductivity (Ks) in the systems Mg^{+2} and Ca^{+2}, the stability of aggregates, the weighted average diameter (WMD) and the structural stability index (EI) was determined by sieving in water holding capacity moisture pressure pots, soil consistency (Atterberg limits), percentage of transmittance (% T), and dispersion of clays. There was a specific effect of Mg^{+2} compared to Ca^{+2} on the structural stability, dispersion of clays and hydraulic conductivity (Ks) for the two horizons studied. The reduction of Ks was greater when the horizons were saturated with Mg^{+2}. Basically the biggest negative effect of Mg^{+2} on the structural stability and hydraulic conductivity is due to its greater hydration energy and its larger radius of hydration, producing more expansion (swelling) of the clays. The dispersion of clays with subsequent obstruction of pores is the process that greatly reduces the conductivity Ks, is the decrease in pore size resulting from the expansion of clays and unbundling. Increasing the electrolyte concentration of the water applied in the columns of soil hydraulic conductivity improves as a result of the aggregation of particles by the contraction of the diffuse double layer decreasing clay dispersion processes. Both horizons when treated with water or higher electrolyte concentration to 10 mM had a significant increase in Ks, possibly due to clay aggregation processes mentioned above, this process is favored by decreased pore clogging which is caused by the expansion and subsequent dispersion of the clays. The moisture holding capacity of the horizons decreased with increasing electrolyte concentration of the water applied.

Keywords: Hydraulic conductivity, Aggregate stability, Clay dispersion, Exchangeable Mg^{+2}.

INTRODUCCIÓN

Los suelos que poseen concentraciones de Mg^{+2} en niveles cercanos o superiores a los de Ca^{+2} en las áreas más fértiles del Valle del Cauca (Colombia) son particularmente problemáticos cuando presentan contenidos apreciables de materiales arcillosos tipo expandible, debido a esta condición, estos terrenos son especialmente susceptibles a la reducción de la propiedades hídricas, efectos físicos parecidos a los del Na^{+}, movimiento muy lento de agua dentro del perfil del suelo debido a la desfloculación de las arcillas, repercutiendo en el crecimiento de las plantas (Madero *et al.,* 2004). Se ha comprobado que el magnesio tiene efectos negativos en la estructura del suelo bajo ciertas circunstancias. Es así como se ha distinguido un efecto específico del magnesio en el decrecimiento de la estabilidad estructural, reducción de la conductividad hidráulica y dispersión de arcillas del suelo, y un efecto no especifico al facilitar la acumulación de sodio en el suelo (Curtin *et al*., 1994; Yousaf *et al*., 1987). Sin embargo, la naturaleza y grado de estos efectos puede disminuir con la concentración de electrolitos hidrosolubles, y presentar variaciones significativas con el tipo de arcilla.

Dadas las condiciones especiales de los suelos del Valle del Cauca existe una gran extensión de suelos con una alta saturación de Mg^{+2} (117.000 ha), Se ha enfatizado sobre extensas áreas de estos suelos, especialmente Vertisoles, Molisoles Alfisoles e Inceptisoles, dando lugar a la clase especial denominada “Suelos Magnésicos”, los cuales son típicos de esta región. Existe especial interés en conocer las interacciones entre las fases y los fenómenos físicos asociados a su mineralogía y los contenidos de humedad del suelo, para orientar los correctivos necesarios para su manejo y aprovechamiento adecuado (Torrente, 2003).

Se ha comprobado que el magnesio tiene efectos negativos en la estructura del suelo bajo ciertas circunstancias. Es así como se ha distinguido un efecto específico del magnesio en el decrecimiento de la estabilidad estructural, reducción de la conductividad hidráulica y dispersión de arcillas del suelo, y un efecto no especifico al facilitar la acumulación de sodio en el suelo (Curtin *et al*., 1994; Yousaf *et al*., 1987). Sin embargo, la naturaleza y grado de estos efectos puede disminuir con la concentración de electrolitos hidrosolubles, y presentar variaciones significativas con el tipo de arcilla.

La recuperación de suelos magnésicos envuelve el reemplazo de una parte del magnesio del complejo de cambio por iones de calcio. El calcio puede provenir de diferentes enmiendas, unas que proporcionan el calcio directamente y otras, que son efectivas en suelos calcáreos, que provocan la disolución de carbonatos de calcio presentes en el suelo.

El yeso y el azufre son las enmiendas frecuentemente usadas, los altos costos de otras enmiendas son los principales factores que limitan su uso. El yeso es prácticamente insoluble en agua razón por la cual se requiere la utilización de grandes volúmenes de agua en el suelo y debido a que la conductividad hidráulica de los suelos magnésicos es baja, se requiere mucho tiempo para su recuperación. El azufre debe ser oxidado por bacterias para formar acido sulfúrico o sulfuros los cuales reaccionan con los carbonatos de calcio. El proceso de oxidación es lento y la recuperación del suelo puede tardar mucho tiempo.

La vinaza es un material líquido resultante de la producción de etanol, ya sea por destilación de la melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de la

caña que se produce en grandes cantidades lo que la convierte en una enmienda alternativa en la recuperación de suelos afectados por una alta saturación de magnesio, puesto que las vinazas poseen una elevada concentración de electrolitos y estos tienen un reconocido efecto floculante, independientemente de su poder fertilizante, se pueden utilizar para promover una mejor agregación de suelos pesados, estructuralmente degradados o con problemas de permeabilidad (García y Rojas, 2006).

El estudio de los suelos con alta saturación de magnesio en Colombia se encuentra en una etapa de caracterización y entendimiento de su génesis, de las condiciones que le dan origen, de sus reacciones iónicas y de intercambio. Con base a lo anterior y teniendo en cuenta que a nivel regional no se tienen estudios sobre el efecto de la concentración de electrolitos en la recuperación de suelos afectados por una alta saturación de magnesio, se justifica la realización de esta investigación con el fin de hacer aportes en el manejo de suelos afectados por sales.

1. OBJETIVOS.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los cambios de algunas propiedades físicas y químicas de un suelo cuando se satura con Magnesio y/o Calcio, y su posible recuperación por medio del lavado y una enmienda orgánica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar el efecto de la saturación con Mg^{+2} y Ca^{+2} sobre la conductividad Hidráulica Saturada (K_s), la estabilidad de agregados, límites de plasticidad y la dispersión de arcillas en ausencia de sodio de dos suelos con texturas contrastante,.

Determinar la variación de la conductividad Hidráulica Saturada (K_s), límites de plasticidad, estabilidad de agregados y dispersión de arcillas de cada suelo evaluado en función del contenido de arcilla y materia orgánica.

Evaluar la variación de la conductividad Hidráulica Saturada (K_s), límites de plasticidad, estabilidad de agregados y dispersión de arcillas de cada suelo después del lavado con aguas de diferente concentración electrolítica y vinaza.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 MAGNESIO EN EL SUELO

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 citado por Zhang y Norton, 2002). 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 un suelo ilitico, saturado con Mg^{+2}, fue mucho mas baja que en un suelo ilitico saturado con Ca^{+2}. 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 formas de interacción del Mg^{+2} 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 especifico, debido a la inhabilidad del Mg^{+} en el agua de riego, para contrarrestar la acumulación de Na-intercambiable en el suelo (Curtin *et al*, 1994).

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, es un ión que tiene efectos deletéreos sobre el suelo causando dispersión de las arcillas y afectando su estructura aireación y conductividad hidráulica en forma similar a como lo hace el Na^{+} intercambiable (García, 1990).

2.2 DIFERENCIAS ENTRE EL MAGNESIO Y EL 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 3). 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 (Katz, 1998 citado por Torrente, 2003).

Tabla 1 Propiedades Químicas de Mg^{+2} y Ca^{+2}.

Ión	*Radio Iónico*	*Calor de Hidratación Kcal.mol^{-1}*	*Numero de Hidratación Mol H_2O/íon*	*Entropía de Hidratación Cal/mol.ºK*	*Electrone gatividad*	*Potencial Iónico*
Ca^{+2}	0.99	-377	8-10	50	1.00	20,20
Mg^{+2}	0.65	-456	9-13	64	1.31	30,77

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^{+2} y las moléculas de agua (Tabla 3).

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 alta 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 la caso de la afección en suelos arcillosos tipo 2:1 con saturación de magnesio superior al 35%, características a tener en cuenta en le manejo adecuado de estos suelos.

2.3 EFECTOS DEL MG^{+2} SOBRE LAS PROPIEDADES FISICAS 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^{+2} produce la expansión extrema de la capa de Stern en los suelos de arcillas vermiculíticas e illíticas, o inhibe la hidrólisis de las montmorillonitas, 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).

Algunos investigadores como Ellis y Caldwel. (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 esta sea masiva en algunos casos y que requieran el uso de prácticas especiales de manejo.

Emerson y Chi (1977), citados por Shainberg y Leter (1984), hicieron una distinción entre el el efecto directo del Mg^{+2} intercambiable como causante en la disminución de la estabilidad estructural del suelo, que fue definido efecto especifico y su habilidad para causar un aumento paulatino de los niveles de Na^{+} intercambiable, 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^{+2} en diversos suelos, ha mostrado que la concentración crítica de floculación de estos 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 estos últimos lo cual origina la menor tasa de flujo. Estos resultados sugieren que el efecto especifico 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 ser debido a la fuerte interacción entre el ión Mg^{+2} y las moléculas de agua asociadas a los minerales arcillos 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).

2.4 **EFECTO DEL MG^{+2} EN LA ESTRUCTURA Y LA POROSIDAD DEL SUELO**

El efecto especifico 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 interlaminar, lo cual 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 el 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 esmectiticas (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 muchos de los fenómenos, 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).

2.5 CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA 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, a causa de varios procesos químicos físicos y biológicos, la conductividad hidráulica puede cambiar a medida que el agua humedece y fluye en un 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*., (1968), encontraron un efecto directo de Mg^{+2} intercambiable en la disminución de la conductividad hidráulica en suelos dominados por illita 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 mmol L^{-1}, pero Mg^{+2} mostró efecto especifico 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 si existió efecto especifico 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^{+2}.

Gómez. (1973) en Colombia reportó que los suelos con arcillas montmorilloniticas 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 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 numero 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 especifico mayor que la ilita 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 esta 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 critica 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^{+2}. La estabilidad de agregados, medida por el método de tamizado en húmedo, fue más grande para los suelos calcicos que para los suelos magnesicos. 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 especifico de Mg^{+2}; esto puede ser porque el efecto de Mg^{+2} en el comportamiento de la arcilla (ejemplo: dispersión y floculación) debe depender no solamente en la mineralogía del suelo arcilloso sino también en la concentración electrolítica de la solución. Además, la presencia de Na^{+} en el sistema del suelo normalmente oculta el efecto del Mg^{+2}. 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^{+2} son causadas parcialmente por las dificultades en la propia separación del efecto de Na^{+}, siendo más fácil evaluar los efectos del Mg^{+2} sin la presencia de Na^{+}.

2.6 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 la superficie de los coloides. 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 los cationes intercambiables y solubles. La concentración real de los cationes en la fase liquida 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, es decir, que los iones remanentes forman una doble capa difusa alrededor de una partícula de densidad de carga reducida.

El espeso de la DCD depende de la concentración de la solución y de la carga del ión. Al aumentar la concentración de la solución se restringe la difusión de cationes desde la superficie hacia la solución del suelo, la cual aumenta con la

difusión del anión en la dirección opuesta. El efecto de la valencia del catión proviene de la fuente de atracción que ejerce los iones de mayor carga hacia la superficie del coloide. La combinación de las dos fuerzas se conoce como energía de interacción neta. Si se produce una fuerza de repulsión, esta 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 compresión de la DCD requiere de la adición de sales al sistema y la reducción de la carga superficial se logra mediante coagulantes inorgánicos, polímeros catiónicos de alto peso molecular. Este principio se usa en la práctica para promover la agregación de suelos dispersos por la acción de iones con efectos deletéreos como el Na^{+} y/o el Mg^{++} (García, 1994).

2.7 VINAZA

La vinaza es un material líquido resultante de la producción de etanol, ya sea por destilación de la melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de la caña de azúcar, está compuesta por materiales orgánicos y nutrientes minerales que hacen parte de compuestos y constituyentes vegetales. (García y Rojas, 2006)

En la actualidad se producirán cerca de 1’350.000 litros de alcohol por día y se generarán vinazas con contenidos de sólidos totales entre 32,5 y 55% en

cantidades aproximadas a los 1’894.500 litros por día en el Valle del Cauca (Quintero, 2004).

2.7.1 Composición química de la vinaza.

La composición de la vinaza es variable y depende de las características de la materia prima, del sustrato, del tipo y la eficiencia de fermentación y destilación, como también de la variedad y la maduración de la caña (García y Rojas, 2006). La composición es muy variable, pero generalmente es rica en nitrógeno, potasio, calcio, azufre normalmente pobre en fósforo. La composición química de la vinaza (Tabla 2) indica que la materia orgánica es el principal constituyente y entre los minerales, el potasio en conjunto con el calcio son los más abundantes.

Tabla 2 Composición química de las vinazas

Composición	**Concentración**
N	-0.33 – 0.48 kg/m^3
P_2O_5	0.09 – 0.61 kg/m^3
K_2O	2.10 – 3.40 kg/m^3
CaO	0.57 – 1.46 kg/m^3
MgO	0.33 – 0.58 kg/m^3
SO_4	1.50 kg/m^3
Mat. Orgánica	19.1 – 45.1 kg/m^3
Cu	2 – 57 ppm
Zn	3 – 57ppm
Relación C/N	15 ppm

Fuente: Adaptación de Korndörfer & Anderson, 1997

Las vinazas producidas en las destilerías del Valle del Cauca presentan en forma general la composición elemental de 55% y 10% de concentración, en ambas se observan los altos contenidos materia orgánica, potasio, sulfatos y óxidos de calcio y de magnesio (Tabla 3.)

Tabla 3 Características de las vinazas de 55% y 10% de sólidos totales.

Análisis	**Unidad**	**Vinaza 55% S. T.**	**Vinaza 10% S. T.**
Matéria Orgânica	(%)	47.77	4.20 – 6.70
N	(kg/m^3)	4.30	0.63 – 1.14
P_2O_5	(kg/m^3)	0.50	0.07 – 10.86
K_2O	(kg/m^3)	41.0	6.0 – 10.86
CaO	(kg/m^3)	7.0	1.05 – 3.14
MgO	(kg/m^3)	9.0	1.34 – 2.26
SO_4^{-2}	(kg/m^3)	35.0	3.88
pH	-	4.3 – 4.5	3.5 – 4.3
Densidad	(kg/m^3)	1.35	1.03

Fuente: Quintero, R. (2004)

Con respecto al potasio y según la información obtenida en los ingenios azucareros, los contenidos medios de K_2O esperados son de 14298 ton/año. La demanda de potasio por el cultivo de la caña de azúcar en los suelos de la parte plana del Valle geográfico del río Cauca se ha estimado en 8.550 toneladas de K_2O por año (Quintero, 2003), demanda estimada con base en los supuestos de que el potasio contenido en la vinaza es tan eficaz como el del cloruro de potasio y que al considerarla como un fertilizante potásico su aplicación al suelo se hará en banda superficial o en el fondo del surco en lotes en renovación. (Quintero, 2004)

Esto hace que en la mayoría de los casos sea usada como fuente fertilizante de potasio y materia orgánica en el mismo cultivo de la caña de azúcar. (Rao, 1983)

También por el alto contenido de materia orgánica y su elevada flora microbiológica, la vinaza presenta un elevado índice de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), por lo que es considerada un material contaminante cuando se vacía a las fuentes de agua (Subiros, 1992)

Cambios en algunas propiedades del suelo por aplicación de vinazas. La aplicación de la vinaza al suelo genera cambios en las algunas características físicas, químicas, dentro de ellas tenemos: pH, disponibilidad de nutrientes principalmente K^+, Materia Orgánica, capacidad de intercambio catíonico, conductividad eléctrica.

Camargo *et al.* (1983) estudiaron los efectos en un suelo oxisol arcilloso tratado con diferentes dosis crecientes de vinaza, y concluyeron que no hubo alteraciones de la arcilla dispersada en agua por la influencia del contenido de materia orgánica. El incremento de la actividad microbiológica está acompañada de la excreción de mucílago, que estimula la agregación de las partículas, además también se observó que no hubo cambios significativos en la densidad y porosidad total del suelo.

Con respecto a la infiltración de agua en el suelo que recibe vinaza aumenta con respecto al control. Camargo *et al.* (1983) mostraron que la infiltración en suelo

arcilloso que recibió 1.000 m^3/ha puede estar relacionada al aumento de la estabilidad de la agregación superficial.

Mazza *et al*. (1986) citados por Korndörfer. (2004) encontró que grandes aplicaciones de este material al suelo pueden aumentar el almacenamiento de agua, la cantidad de agua disponible y los niveles de tensión. Estos autores apreciaron un cambio de color con la profundidad, donde sugieren que esas modificaciones se dan por las formas de óxidos de hierro.

Algunos estudios reportados por (Korndörfer, 2004) indican, que existe una variación en cuanto a los cationes intercambiables en diferentes tipos de suelos lo que implica una alteración en la suma y porcentaje de saturación de bases.

Nunes *et al.,* (1982), estudiando el K^+, Ca^{+2} y Mg^{+2} observaron un aumento en la lixiviación de esos cationes debido al aumento de las dosis de vinaza y el magnesio proporcionalmente se lixivió más que el calcio.

La aplicación de vinaza también causó la elevación del pH, de 4.4 a 6.0, este aumento según diversos autores citados por Korndöfer, (2004) es considerado por las condiciones anaeróbicas locales y temporales (disminución del potencial redox) y el aumento de la saturación de bases.

Camargo *et al.,* (1983), evaluaron la dinámica de las formas de nitrógeno y de azufre en suelo tratado con vinaza, el nitrato fue mayor que el de amoniaco, fenómeno que se explica por la velocidad de la reacción que favorece la

nitrificación. El mismo autor observó incrementos en la disponibilidad de los micronutrientes.

2.7.2 Efecto del Sulfato de Ca^{+2} en la recuperación de suelos dispersos y expandidos.

La forma más común del sulfato de calcio es el hidratado que se presenta como $CaSO_4.2H_2O$., gran parte del sulfato de calcio usado en la agricultura proviene de mina y es pulverizado. Los tamaños de partícula más pequeños son más rápidamente solubles que los tamaños grandes. El sulfato de calcio es también un subproducto industrial, como en la producción de ácido cítrico o en la recuperación de gases sulfurosos de la industria azucarera (Rodríguez, 2006).

El sulfato de calcio se utiliza en la agricultura de varias formas, y se han documentado muchos beneficios de su uso, entre los cuales se pueden resaltar que mejora la estructura del suelo, previene el encostramiento, aporta solutos para el agua de irrigación, corrige la compactación, ayuda a ser más estable la materia orgánica, hace más efectivos los polímeros solubles en agua como acondicionadores, hace no-iónico al Mg, corrige la acidez del subsuelo, mejora la eficiencia en el uso del agua, mejora la conductividad eléctrica (CE) (Marulanda y García 1994).

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 Ca/Mg < 2 se atenuó cuando el contenido de materia orgánica fue similar a 5% o con mineralogías caoliníticas; con mineralogías micáseas el efecto se dió desde relaciones Ca/Mg 2-3. Valores de Ca^{+2} > 10 Cmol (+)/kg y pH 7.5 inhibieron la acumulación de Na^{+}

3. METODOLOGÍA.

3.1 LOCALIZACIÓN

El trabajo se realizó en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Valle del Cauca.

3.2 CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS SUELOS

Se utilizaron los dos primeros horizontes de un suelo (Udenthic Haplustoll, francoso fino/Francoso/fino), típico de la zona plana del Valle del Cauca, seleccionado con base en su mineralogía, propiedades químicas, contenido de arcillas, y en especial, sin contenido de sodio.

Se colectaron los primeros 20 cm de cada horizonte, el suelo utilizado se secó al aire y tamizó por una malla de 4 mm, se homogenizaron y se tomaron muestras para determinar sus características Físicas y Químicas como se detalla a continuación.

- Se determinó la distribución de tamaño de partícula (Textura) por el método de la pipeta

- **pH** fue medido en relación Suelo:Agua 1:1 en agua.

- Cationes intercambiables: Ca^{+2}, Mg^{+2}, extraídos con acetato de amonio 1N a pH 7 y determinados por espectrofotometría de absorción atómica.

- Capacidad de intercambio catíonico se determinó por el método de acetato de amonio pH 7 (IGAC 1990).

- Estabilidad de agregados al agua (Método Yoder). Sé le realizo la prueba al suelo inicialmente y después de saturarlo con Mg^{+2} o Ca^{+2} y también después de ser lavados con las soluciones de diferente conductividad eléctrica.

- Curva de retención de humedad. Humedad de saturación, humedad a 0,3 y 15 bares sé determinó con las ollas y platos de presión respectivamente.

- Consistencia del suelo. Se utilizaron los límites de Atterberg.

3.3 PREPARACIÓN DE COLUMNAS

Después de homogenizados los suelos se empacaron en un volumen predeterminado, a una altura de 20 cm en columnas de PVC de 25 cm de longitud y 7.62 cm de diámetro, a una densidad de 1,3 gr/cm^{-3}, para lo cual se requirieron 1211 gr de suelo seco del horizonte A, y 1193 gr de suelo seco del horizonte B.

Para consolidar el suelo nuevamente se realizaron dos ciclos de humedecimiento secado, aplicando por capilaridad agua destilada para las muestras sin tratamiento y soluciones de $MgCl_2$ o $CaCL_2$ a una concentración de 250 mM, debido al elevado grado de solubilidad de estas sales se garantizó una alta saturación de cada elemento sobre los sitios de cambio del suelo. Posteriormente a las columnas con

suelo se les efectuó un lavado con las mismas soluciones de saturación arriba mencionadas a razón de 2 volúmenes de poros del suelo durante toda la noche y después se realizo un lavado con agua para remover el exceso de sales.

3.4 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES A APLICAR

Por cada suelo se prepararon 36 columnas con suelo en un arreglo completamente al azar, con nueve tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos corresponden a la concentración de cada una de las sales de sulfato y vinaza utilizadas.

A cada suelo se le aplicaron los tratamientos con soluciones de $CaSO_4$ o $MgSO_4$ en concentraciones sucesivas de 50,10, 2, 0.5, mM, no se consideró el tratamiento con agua desionizada debido a los efectos dispersantes que produce en suelos con alta saturación de Mg^{+2} (Quirk, 1994), adicionalmente se preparó un tratamiento con vinaza (relación vinaza-agua 1:1). En la tabla 4 se indican las cantidades necesarias para preparar un litro de la solución para la diferentes concentraciones estudiadas, así como su CE y pH.

Tabla 4 Cantidades necesarias para preparar un litro de solución en las diferentes concentraciones electrolíticas estudiadas

Tratamiento	Concentración	$MgSO_4$ gr L^{-1} *	$CaSO_4$ gr L^{-1} **	CE	pH
1	50 mM MgSO4	12,38		5,76	5,62
2	10 mM MgSO4	2,48		1,6	5,54
3	2 mM MgSO4	0,5		0,45	5,51
4	0,5 mM MgSO4	0,124		0,146	5,49
5	50 mM CaSO4		8,69	2,21	6,59
6	10 mM CaSO4		1,73	1,5	6,5
7	2 mM CaSO4		0,35	0,41	5,91
8	0,5 mM CaSO4		0,087	0,136	5,69
9	Vinaza-Agua (1/1)			20,3	4,15

*** $MgSO_4$* 7 H_2O ** $CaSO_4$* 2 H_2O**

Se usaron botellas de Mariotte para mantener una cabeza constante de agua de 5 cm sobre la superficie del suelo y se aplicó una cantidad de solución a una determinada concentración según el tratamiento, equivalente a un volumen de poros, el cual se calculó a partir de la porosidad y la altura de la columna, 461 y 424 cc para el horioznte A y B respectivamente, el lavado total correspondió a tres volúmenes de poros. A partir de esta prueba se determinó la conductividad hidráulica saturada (Ks)

3.5 ANÁLISIS DE EFLUENTES

Se colectaron efluentes por cada uno de los tres volúmenes de poros aplicados, y se determinaron conductividad eléctrica (CE) y pH para todas las muestras. También se determinaron Mg^{+2} y Ca^{+2} por espectrofotometría de absorción atómica, además se realizó porcentaje de transmitáncia a una longitud de onda de 420 nm por medio de un espectrofotómetro para determinar la presencia de arcilla en el efluente.

3.6 CARACTERIZACIÓN FINAL

Finalmente después del proceso de lixiviado de las columnas, los núcleos de suelo fueron cuidadosamente retirados de las columnas y secados al aire. Se determinaron nuevamente estabilidad de agregados (Método Yoder) con dos repeticiones por columna de suelo, se calculó porcentaje de agregados estables y el diámetro medio ponderado (DMP), curva de retención de humedad y consistencia del suelo (límites de Atterberg), coeficientes de dispersión.

3.7 MANEJO DE LA INFORMACIÓN

Para analizar el efecto del Magnesio y Calcio sobre algunas propiedades físicas del suelo, y el efecto de la concentración electrolítica del agua de riego y teniendo en cuenta que la planeación del ensayo, se trabajó con un diseño completamente al azar. Se realizó el análisis de varianza con el paquete estadístico (SAS), y pruebas de significancia y de comparación de Duncan.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

4.1.1 Caracterización química inicial.

El suelo (Udentic Haplustoll, francoso fino/Francoso/fino, isohipertermico. Fase (1-3%) localizado al sur del ICA (Coordenadas), con un horizonte A (Hzt A) que se caracteriza por tener una reacción prácticamente neutra (pH= 6.83). El contenido de materia orgánica (M.O.) es de 5.8% el cual puede considerarse como un nivel alto para las condiciones del valle del Cauca, además, la conductividad eléctrica CE es de 0.93 dS/m lo que evidenció baja salinidad. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se encontró en un valor medio y los valores de cationes intercambiable Ca^{++} y Mg^{++} son relativamente altos (Tabla 5)

El horizonte B (Hzt B) presentó cambios marcados frente al (A): una reacción moderadamente alcalina (pH= 8.02), una CE aún más baja (0.29 dS/m), y un contenido de M.O muy inferior al del horizonte anterior. Los cationes intercambiables se encuentran en un nivel medio y la capacidad de intercambio catiónico CIC es baja (Tabla 5).

Tabla 5 Algunas características químicas iniciales de los horizontes en estudio

Parámetro	Horizonte A	Horizonte B
pH	6,83	8,02
CE dS/m	0,93	0,29
M.O. %	5,80	0,50
Mg^{+2} (C mol(+)/Kg^{-1})	5,10	2,20
Ca^{+2} (C mol(+)/Kg^{-1})	12,30	5,90
CIC (C mol(+)/Kg^{-1})	17,70	6,50

4.1.2 Caracterización física Inicial.

La distribución del tamaño y ordenación de partículas de un suelo (Textura) determinan parcialmente sus relaciones con el aire y el agua, de este modo se observó que el Hzt A tiene un 18% mas arcilla que el Hzt B, la clase textural del primero es franco arcilloso mientras que la del segundo es franco limoso, la diferencias con respecto al limo y las arenas son más pronunciadas. Con respecto a la fracción arcilla en el Hzt A es dominante la vermiculita y abundante la mica, con una proporción media se encuentra la montmorillonita y la caolinita, el Hzt B también presentó dominancia de vermiculita, pero con una cantidad mediana de montmorillonita, mica y caolinita (Tabla 6).

La estabilidad de agregados mostró que el Hzt A posee un índice de estabilidad estructural (IE) y un diámetro medio ponderado (DMP) mas altos que el Hzt B este ultimo tiene 95.64% de agregados menores de 0.25 mm estables al agua frente a 53.97% del Hzt A, lo que indica una estabilidad estructural muy baja. Estos valores son importantes por que el tamaño de los agregados estables al agua determinan el tamaño de poros lo que a la vez podría condicionar el movimiento y la

distribución del agua y el aire, además de determinar la susceptibilidad de ser arrastrados por el agua de escorrentía, ICA (1990) (Tabla 6).

El Hzt A presentó valores de retención de humedad más altos que el Hzt B, ya que el primero posee mayor porcentaje de arcillas y M.O haciendo que la textura y estructura sean unas de las propiedades físicas que más altera la retención de humedad del suelo, sin embargo se debe tener en cuenta que en la determinación de la curva de retención de humedad se realizó con muestra disturbada haciendo que dichos valores se incrementen. En cuanto a la plasticidad, la diferencia entre ambos horizontes fue marcada, el Hzt A se considera como plástico y el Hzt B no plástico (Tabla 6).

La densidad real o de partículas se refiere a la relación de peso por unidad de volumen de los sólidos del suelo sin tener en cuenta el espacio poroso. Esta característica guarda una estrecha relación con la composición mineralógica y el contenido de materia orgánica y es por esta ultima razón que el Hzt A posee un valor de densidad real mas baja debido a su alto contenido de materia orgánica mientras que el Hzt B presenta valores de densidad real mas alto ligado posiblemente al dominio en la fracción inorgánica de minerales pesados como los ferromagnesianos característicos del Valle del rio Cauca, (García, 1986) (Tabla 6).

Otra propiedad física importante en los suelos es la conductividad Hidráulica la cual depende de la porosidad total del suelo, del contenido de humedad y de la distribución del tamaño de partículas, esta propiedad en el Hzt A presentó valores superiores (Ks= 3.01 cm/h) que el Hzt B (Ks= 0.26) debido a que el primero mostró un índice de estabilidad estructural mayor (Tabla 6).

El coeficiente de dispersión de Arcillas es más alto en el Hzt B, lo que corresponde con el alto porcentaje de agregados menores de 0.25 mm que presentó este suelo los cuales son lixiviados por el agua a través del perfil del suelo (Tabla 6).

Tabla 6 Algunas características físicas iniciales de los horizontes en estudio

Propiedad	Horizonte A	Horizonte B
Arena (%)	28,68	15,68
Limos (%)	42,28	60,28
Arcilla (%)	29,04	24,04
Clase Textural	**F Ar**	**FL**
Mineralogía de Arcillas*	Vermiculita (5) Mica (4) Montmorillonita(3)Caolinita(3)	Vermiculita (5) Mica (3) Montmorillonita(3) Caolinita(3)
Humedad Higroscopica (%)	2,15	0,65
Humedad de Saturación (%)	52,32	45,31
Humedad a 0,3 Bares (%)	35,15	20,47
Humedad a 1,5 Bares (%)	32,37	18,95
Humedad a 15 Bares (%)	20,07	11,05
Lamina Agua Aprovechable LAA (%)	15,08	9,42
Lamina Agua Facilimente Aprovechable LAFA (%)	2,78	1,52
Indice LAFA/LAA	0,18	0,16
Densidad Real (g cm^{-3})	2,57	2,79
Limite Plastico Superior (%)	37,06	25,80
Limite Plastico Inferior (%)	23,99	18,61
Indice de Plasticidad (%)	13,07	7,19
Estabilidad de Agregados		
Mayores de 2 mm (%)	1,27	0,56
Entre 2 y 1 mm (%)	4,59	0,64
Entre 1 y 0,5 mm (%)	25,39	1,76
Entre 0,5 y 0,25 mm (%)	14,79	1,40
Menores de 0,25 mm (%)	53,97	95,64
Indice de Estabilidad (%)	0,811	0,0395
Diametro Medio Ponderado	0,401	0,1648
Conductividad Hidraulica (cm/h)	3,012	0,261
Coeficiente de dispersión de Arcillas (%)	35,362	75,1293

*(5)=dominante; (1)=muy poca

4.2 EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS

4.2.1 Propiedades Químicas después de saturar con Cl_2Mg o Cl_2Ca.

En la tabla 7 se presenta las variaciones observadas en algunas propiedades químicas de los horizontes del suelo en estudio después de ser saturado con Mg^{+2} o Ca^{+2}. Con respecto al estado inicial ambos horizontes disminuyeron los valores de pH debido a la contracción de la doble capa difusa y salida de hidrógenos a la solución como resultado del incremento de la fuerza iónica en la solución externa y el intercambio de Mg^{+2} y Ca^{+2} en las cargas negativas de los coloides (Fassbender, H. W, 1987; Bohn *et al,* 1979; Sumner, M. E., 1992).

La CE se incrementó en ambos horizontes como consecuencia del ingreso de sales hidrosolubles al sistema, sin embargo, se presentaron valores más altos de CE en el Hzt B debido posiblemente a la menor cantidad de arcilla y M.O de este, lo que le imprime una menor capacidad buffer (Tabla 7).

Los valores de M.O. orgánica disminuyeron ligeramente, probablemente por lixiviación, sin embargo Zhang y Norton (2002) encontraron que el carbono orgánico total de un Hapludalf típico disminuyó cuando este suelo fue saturado con Mg^{++}. De otro lado la capacidad de intercambio catíonico (CIC) permaneció estable con respecto al estado inicial en ambos horizontes debido al predominio de carga permanente en estos suelos (Tabla 7).

En los dos horizontes la saturación con Ca^{+2} llevó a una disminución del Mg^{+2} frente al estado inicial, y viceversa, la saturación con Mg llevó a una disminución del Ca inicial, lo cual comprobó que el catión dominante desplaza a los otros en alguna medida, esto debido posiblemente en el aumento en la concentración electrolítica de la solución lo que comprime la doble capa difusa generando un intercambio de cationes desde la superficie de los coloides, sin embargo se debe tener en cuenta la afinidad o grado de preferencia de las arcillas por un catión, es así como la montmorillonita muestra afinidad por el Ca^{++} por encima del Mg^{++} (Hunsaker and Pratt, 1971), mientras que la vermiculita muestran una preferencia por el Mg^{++} por encima del Ca^{++} (Rahman and Rowell, 1979).

Los dos horizontes saturados con Mg^{+2}, no alcanzaron el grado de saturación que se alcanzó con Ca^{+2}, en razón a que ambos comenzaron con relativamente menor contenido de Mg^{+2}. Así mismo, nótese que en el estado inicial de los suelos, sumando bases sin tener en cuenta K y Na, en el horizonte B aparentemente se sobresaturó de bases el suelo, en A está casi al 100%, y el mismo resultado se desprende al hacer el ejercicio después de saturar con Ca^{+2} y Mg^{+2}; la razón estriba en el método para determinar la CIC y los cationes intercambiables en suelos altos en bases, como lo han documentado Gómez (1994)

Tabla 7 Algunas propiedades químicas de los horizontes estudiados después de la saturación con Mg^{+2} y Ca^{+2}

Parámetro	**Hzt A Inicial**	Hzt A Saturado Mg	Hzt A Saturado Ca	**Hzt B Inicial**	Hzt B Saturado Mg	Hzt B Saturado Ca
pH	**6,83**	5,94	5,87	**8,02**	7,04	7,29
CE dS/m	**0,93**	45,60	47,40	**0,29**	54,30	50,75
M.O. %	**5,80**	5,55	5,60	**0,50**	0,45	0,50
Cationes Intercambiables						
Mg^{+2} (C mol (+) Kg^{-1})	**5,10**	11,20	4,40	**2,20**	3,40	1,20
Ca^{+2} (C mol (+) Kg^{-1})	**12,30**	11,90	21,00	**5,90**	4,10	6,80
CIC (C mol (+) Kg^{-1})	**17,70**	17,70	17,70	**6,50**	6,50	6,50

4.2.2 Propiedades físicas después de saturar con $MgCl_2$ y $CaCl_2$.

En general disminuyó la calidad física de los suelos ya que aumentó la retención en todos los puntos de humedad, la plasticidad y el coeficiente de dispersión de las arcillas, y disminuyeron la estabilidad de agregados y la conductividad hidráulica, todo lo cual concordó con lo hallado por Zhang y Norton (1998), Quirk (1994), Emerson y Chi (1977) cuando ocurre un enriquecimiento con Mg^{++} o Ca^{++} en suelos con predominio de arcillas micáceas y expandibles, debido a su alto calor de hidratación, ocasiona una pérdida de floculación y estabilidad del suelo, por un debilitamiento de las uniones entre cristales de arcilla en los puntos donde estas bases están haciendo puente.

No obstante, los efectos de estas saturaciones con Ca fueron en varios aspectos menos impactantes como se verá a continuación, lo que se puede explicar por su

menor radio de hidratación y menor potencial iónico frente a Mg^{+2} (Bohn *et al* 1979), (Tabla 8).

- Retención de Humedad

En general, los suelos Magnésicos (saturados con Mg^{+2}) frente a los Cálcicos (saturados con Ca^{+2}) retuvieron significativamente más agua en los puntos de humedad evaluados, y en consecuencia tuvieron mayores LAA y LAFA y menores relaciones LAFA / LAA, debido a los efectos del relativo mayor radio de hidratación del Mg^{+2} que del Ca^{+2} lo que modifica la estructura y la capacidad de retención de los suelos (Zhang and Norton 2002). En el suelo B hubo excepciones, el Cálcico tuvo un mayor efecto en los puntos de humedad a 1.5 bar y a 15 bar, en la LAA y en la LAFA, y es de anotar que en este suelo, calcio siempre fue dominante en el complejo de cambio, aún en el magnésico, y esta pudo ser la causa de los cambios Quirk (1994), sin embargo, este suelo presentó una mejor relación LAFA / LAA que también fue mayor (Tabla 8).

- Límites de Atterberg

Como se dijo al inicio, el incremento de la saturación de bases trajo consigo un incremento de los límites de plasticidad, lo cual fue un efecto positivo difícil de explicar pues se esperaba lo contrario, sin embargo, en el caso de los suelos Magnésicos esto llevó a algo negativo: muy altas plasticidades, corroborando una vez más lo expuesto por Quirk (1994), Emerson y Chi (1977). Aquí vale resaltar que en los suelos Cálcicos las plasticidades fueron iguales o solo ligeramente superiores a los estados iniciales (Tabla 8).

- Estabilidad de agregados

Magnesio tuvo una mayor tendencia a aumentar el porcentaje de agregados más pequeños en todos los casos, y esto también se manifestó en relativamente menores índices de agregación y diámetro medio ponderado ($p \leq 0.05$), correspondientes con coeficientes de dispersión más altos para este tratamiento, lo que comprueba el efecto deletéreo del Mg^{+2} (Tabla 8).

- Conductividad hidráulica saturada

El efecto del Mg^{+2} también se manifestó con mayor fuerza en esta propiedad, pero en el horizonte B los tratamientos quedaron muy cerca de las condiciones de partida debido a que estas fueron de por si muy bajas (Tabla 8).

- Coeficiente de Dispersión de Arcillas

El Mg^{+2} produjo aumentos significativamente más altos que el Ca^{+2} en el coeficiente de dispersión de arcillas en ambos horizontes con respecto al suelo inicial, sin embargo el efecto fue más altos en el horizonte B debido posiblemente a los bajos contenidos de M.O. haciéndolo más susceptible a tal efecto (Tabla 8).

Tabla 8 Algunas propiedades físicas de los horizontes estudiados de la saturación con Cl_2Mg o Cl_2Ca

Propiedad	Hzt A Inicial		Hzt A Mg		Hzt A Ca		Hzt B Inicial		Hzt B Mg		Hzt B Ca	
Humedad Higroscópica (%)	2,15	e	4,53	a	3,55	b	0,65	f	2,96	c	2,39	d
Humedad de Saturación (%)	52,32	d	65,15	a	60,94	b	45,31	e	54,45	c	51,97	d
Humedad a 0,3 Bares (%)	35,15	b	42,24	a	36,18	b	20,47	e	25,86	d	27,49	c
Humedad a 1,5 Bares (%)	32,37	b	39,96	a	34,19	b	18,95	e	24,79	d	25,83	c
Humedad a 15 Bares (%)	20,07	d	29,24	a	26,84	b	11,05	e	20,26	d	21,75	c
Lamina Agua Aprovechable LAA (%)	15,08	a	13,01	a	9,34	b	9,42	b	5,60	c	5,74	c
Lamina Agua Facilmente Aprovechable LAFA (%)	2,78	a	2,28	b	1,99	c	1,52	e	1,07	f	1,66	d
Índice LAFA/LAA	0,18	bc	0,18	bc	0,21	b	0,16	c	0,19	bc	0,29	a
Densidad Real (g cm^{-3})	2,57						2,79					
Límite Plástico Superior (%)	37,06	d	47,44	a	39,36	c	25,80	f	40,79	b	35,12	e
Límite Plástico Inferior (%)	23,99	d	32,09	a	28,25	b	18,61	e	25,56	c	24,42	d
Índice de Plásticidad (%)	13,07	b	15,35	a	11,11	c	7,19	d	15,23	a	10,70	c
Estabilidad de Agregados												
Mayores de 2 mm (%)	1,27	a	0,25	c	1,10	a	0,56	b	0,67	b	0,51	b
Entre 2 y 1 mm (%)	4,59	a	0,88	c	4,32	b	0,64	d	0,48	d	0,56	d
Entre 1 y 0,5 mm (%)	25,39	a	11,43	c	23,60	b	1,76	d	0,71	e	1,41	de
Entre 0,5 y 0,25 mm (%)	14,79	b	20,04	a	14,76	b	1,40	c	0,55	c	1,43	c
Menores de 0,25 mm (%)	53,97	e	67,40	c	56,22	d	95,64	b	97,58	a	96,10	b
Indice de Estabilidad (IE) (%)	0,811	a	0,4782	c	0,7446	b	0,0395	d	0,0177	e	0,0352	d
Diametro Medio Ponderado (DMP)	0,401	a	0,2569	c	0,3824	b	0,1648	d	0,1584	d	0,1599	d
Conductividad Hidraulica (Ks)(cm/h)	3,012	a	0,968	c	1,081	b	0,261	d	0,209	f	0,229	e
Coeficiente de dispersión de Arcillas (gr)	35,362	e	82,870	bc	70,739	d	75,129	cd	96,680	a	89,159	ab

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido horizontal no presentan diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

4.3 EFECTO DEL LAVADO CON SOLUCIONES DE $MGSO_4$ Y $CASO_4$

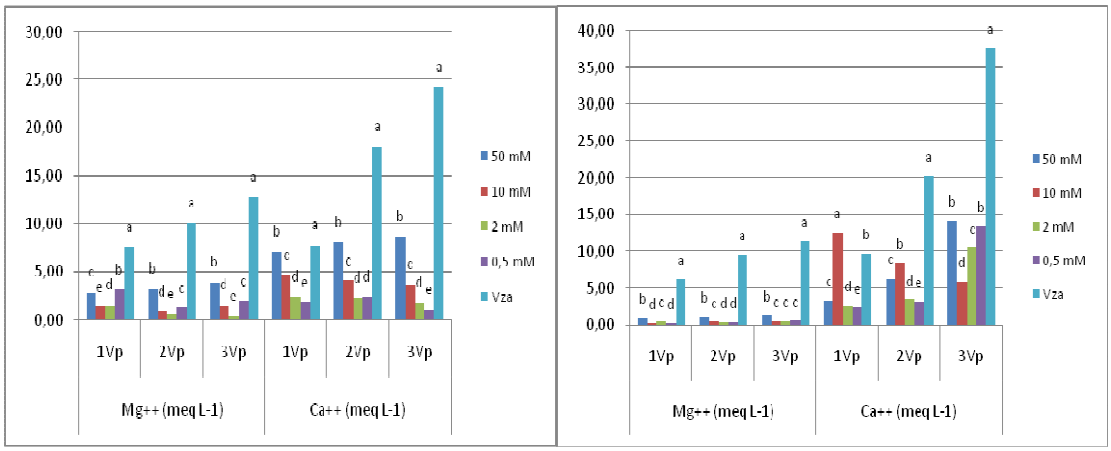
4.3.1 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el Efluente.

Las variaciones en la concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente de los horizontes en estudio en condiciones Magnésicas y Cálcicas, dependen básicamente de la concentración de estos dos cationes en la solución lixiviante o de entrada y el catión dominante que presenta el suelo en el complejo de cambio, es así como al aumentar el volumen de agua percolado aumentó gradualmente, en algunos casos, la concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente hasta alcanzar valores similares a la concentración de estos elementos en el agua aplicada. Eso indica que ambos cationes participan en el proceso de reemplazo por otros iones en las posiciones de intercambio hasta que se alcanza un equilibrio es decir un estado estable que se evidencia por una concentración similar del efluente en el tiempo. En general fue más fácil extraer Ca^{+2} que Mg^{+2}, excepto en horizonte B magnésico que se explicara cuando se trate ese horizonte, probablemente por que Ca^{+2} siempre fue más abundante en los suelos saturados.

En el horizonte A, en general, una concentración de 50 mM en el agua de riego, la más alta, fue necesaria tanto en Magnésico como en Cálcico para lavar la máxima cantidad de Ca^{+2} y Mg^{+2}, posiblemente porque los contenidos relativamente altos de arcilla y materia orgánica permitieron un mayor retención de estos iones, y esto requirió más fuerza iónica (FAO, 2000) (Tablas 9 y 10).

El tratamiento con vinaza generó los valores más altos de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente debido a los altos valores iniciales de dicha sustancia, de otro lado el

horizonte A Cálcico se presentó la misma dinámica en el lavado que en el caso anterior, estos resultado indican posiblemente que la remoción de Ca^{+2} del complejo de cambio es más eficiente cuando se utiliza $MgSO_4$ debido principalmente a la más alta solubilidad del $MgSO_4$, además las propiedades físicas del suelo saturado con Ca^{+2} fueron mejores que las del Mg^{+2} lo que contribuyo a una mayor eficiencia de lavado (Tabla 9 y 10)(Fíg 1).



Fígura 1 Concentración de Mg^{++} y Ca^{++}en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte A Magnésico (Izq) y Cálcico (Der)

Tabla 9 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte A Magnésico

Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp		Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp	
	Mg++ (meq L-1)							Ca (meq L-1)					
50 CaSO4	2,86	**c**	3,20	**b**	3,91	**b**	50 MgSO4	7,10	**b**	8,15	**b**	8,65	**b**
10 CaSO4	1,37	**e**	0,91	**d**	1,54	**d**	10 MgSO4	4,69	**c**	4,09	**c**	3,67	**c**
2 CaSO4	1,58	**d**	0,68	**e**	0,43	**e**	2 MgSO4	2,45	**d**	2,25	**d**	1,83	**d**
0,5 CaSO4	3,18	**b**	1,28	**c**	1,98	**c**	0,5 MgSO4	1,85	**e**	2,48	**d**	1,11	**e**
Vza	7,64	**a**	10,11	**a**	12,81	**a**	Vza	7,85	**a**	18,10	**a**	24,35	**a**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

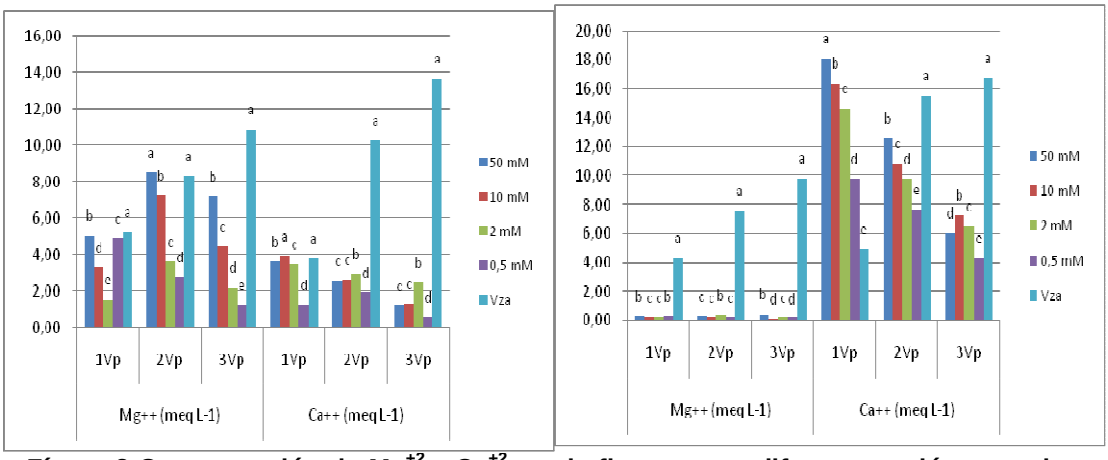
Tabla 10 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte A Cálcico

Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp		Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp	
	Mg++ (meq L-1)							Ca (meq L-1)					
50 CaSO4	0,88	**b**	1,08	**b**	1,23	**b**	50 MgSO4	3,25	**c**	6,27	**c**	14,07	**b**
10 CaSO4	0,17	**d**	0,39	**c**	0,45	**c**	10 MgSO4	12,45	**a**	8,28	**b**	5,75	**d**
2 CaSO4	0,50	**c**	0,29	**d**	0,48	**c**	2 MgSO4	2,54	**d**	3,35	**d**	10,49	**c**
0,5 CaSO4	0,21	**d**	0,31	**d**	0,55	**c**	0,5 MgSO4	2,33	**e**	3,11	**e**	13,34	**b**
Vza	6,19	**a**	9,51	**a**	11,31	**a**	Vza	9,62	**b**	20,22	**a**	37,56	**a**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

De otro lado en el horizonte B para lavar la máxima cantidad de Mg^{+2} en este suelo relativamente más grueso, se requirieron 50 mM en el agua de riego tanto en Magnésico como en Cálcico; mientras que para lavar Ca^{+2}, se necesitó 2 mM en Magnésico y 10 en Cálcico en el agua de riego (Tablas 11 y 12)(Fíg 2). El Mg^{+2} requirió más fuerza iónica que Ca^{+2} es por su mayor calor de hidratación (Bonh et al 1979); en el caso del Ca^{+2}, la razón para que requiriera de una agua más concentrada en el horizonte Cálcico, estriba en que su nivel se hallaba por debajo

del inicial, y además, el $MgSO_4$ trabaja menos eficazmente en Cálcico por efecto del menor potencial iónico del Mg^{+2} en la sal (Grenee y Ford, 1983) (Tablas 5 y 7).



Fígura 2 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte B Magnésico (Izq) y Cálcico (Der)

Tabla 11 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte B Magnésico

Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp		Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp	
	Mg++ (meq L-1)							Ca (meq L-1)					
50 CaSO4	5,06	**b**	8,54	**a**	7,22	**b**	50 MgSO4	3,62	**ab**	2,58	**c**	1,21	**c**
10 CaSO4	3,33	**d**	7,24	**b**	4,46	**c**	10 MgSO4	3,95	**a**	2,65	**c**	1,33	**c**
2 CaSO4	1,54	**e**	3,63	**c**	2,20	**d**	2 MgSO4	3,52	**c**	2,95	**b**	2,46	**b**
0,5 CaSO4	4,90	**c**	2,79	**d**	1,25	**e**	0,5 MgSO4	1,25	**d**	1,92	**d**	0,59	**d**
Vza	5,27	**a**	8,34	**a**	10,87	**a**	Vza	3,81	**a**	10,30	**a**	13,66	**a**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

Tabla 12 Concentración de Mg^{+2} y Ca^{+2} en el efluente para diferentes volúmenes de poros, como resultado de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica en el Horizonte B Cálcico

Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp		Concentración Electrolitica mM	1Vp		2Vp		3Vp	
	Mg++ (meq L-1)							Ca (meq L-1)					
50 CaSO4	0,27	**b**	0,22	**cd**	0,39	**b**	50 MgSO4	18,09	**a**	12,60	**b**	6,03	**d**
10 CaSO4	0,16	**c**	0,15	**d**	0,10	**cd**	10 MgSO4	16,37	**b**	10,88	**c**	7,25	**b**
2 CaSO4	0,18	**c**	0,32	**b**	0,17	**c**	2 MgSO4	14,64	**c**	9,74	**d**	6,51	**c**
0,5 CaSO4	0,24	**b**	0,15	**d**	0,12	**cd**	0,5 MgSO4	9,78	**d**	7,69	**e**	4,29	**e**
Vza	4,30	**a**	7,61	**a**	9,80	**a**	Vza	4,89	**e**	15,51	**a**	16,81	**a**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

4.3.2 Cambios físicos en los suelos

- Porcentaje de Transmitancia y Dispersión de Arcillas.

De acuerdo a los resultados, el valor de porcentaje de transmitancia se redujo a medida que disnimuyó la concentración electrolítica de las soluciones de lavado, indicando un acelerado proceso de dispersión de arcillas. Los mínimos valores de (%T) fueron cerca del 88% y 81% para el horizonte A y B Cálcicos respectivamente, y 72% y 45% para el horizonte A y B Magnésico respectivamente. La más alta turbidez en el horizonte Magnésico muestra que este ion debilitó relativamente más la estructura. Esto podría ser explicado por una rápida separación de cristales de arcilla resultado del hinchamiento excesivo, el gradiente de sales entre microporos y macroporos de los agregados podría causar movimiento de agua osmótica dentro del agregado, lo cual causaría su debilidad (Zhang y Norton, 2002).

En la tabla 13, se presentan las variaciones del porcentaje de transmitancia y el coeficiente de dispersión de arcillas del Horizonte A Magnésico y Cálcico después de ser tratados con aguas de diferente concentración electrolítica. Tanto en el Magnésico como en el Cálcico el análisis de varianza permitió establecer diferencias significativas entre los tratamientos de alta y baja concentración en los tres volúmenes de poros, evidenciando un aumento del porcentaje de transmitancia, con la correspondiente disminución del coeficiente de dispersión, en los tratamientos de alta concentración, sin embargo, dichos valores dispersión fueron más bajos en el Cálcico, como era de esperarse por su menor calor de hidratación. Zhang y Norton (2002) indican que el Mg^{+2} al tener mayor energía de hidratación y mayor radio de hidratación que el Ca^{+2}, produce una más amplia hinchazón de las arcillas que inevitablemente conlleva a una ruptura de agregados y una baja estabilidad estructural.

Tabla 13 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en el porcentaje de transmitancia y el coeficiente de dispersión de arcillas del horizonte A Magnésico y Cálcico

Concentración Electrolítica mM	Mg++ Vp1 % T		Mg++ Vp2 % T		Mg++ Vp3 % T		Mg++ Coef Ar		Ca++ Vp1 % T		Ca++ Vp2 % T		Ca++ Vp3 % T		Ca++ Coef Ar	
50 MgSO4	88,57	**a**	91,13	**a**	93,23	**a**	35,11	**g**	89,07	**b**	92,73	**b**	95,40	**b**	27,78	**f**
50 CaSO4	89,07	**a**	91,07	**a**	92,53	**abc**	37,44	**g**	89,87	**a**	92,73	**b**	95,97	**ab**	35,22	**ef**
10 MgSO4	87,67	**b**	90,80	**a**	92,10	**bc**	43,46	**f**	87,83	**cd**	94,17	**a**	96,67	**a**	40,18	**de**
10 CaSO4	88,43	**a**	91,33	**a**	92,67	**ab**	34,43	**g**	88,47	**bc**	93,80	**a**	96,73	**a**	30,62	**f**
2 MgSO4	78,73	**d**	87,13	**c**	90,70	**d**	47,27	**e**	85,73	**e**	89,67	**d**	91,70	**d**	43,46	**de**
2 CaSO4	81,80	**c**	88,63	**b**	91,60	**cd**	46,42	**ef**	87,20	**d**	90,57	**c**	92,70	**c**	45,43	**d**
0,5 MgSO4	72,77	**f**	77,80	**e**	80,07	**f**	72,19	**c**	82,80	**f**	88,37	**e**	89,70	**e**	66,65	**bc**
0,5 CaSO4	77,37	**e**	80,90	**d**	83,63	**e**	62,93	**d**	83,17	**f**	89,10	**de**	89,70	**e**	60,62	**c**
Vza	ND		ND		ND		118,45	**a**	ND		ND		ND		157,71	**a**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

El horizonte B (Tabla 14) se presentó la misma tendencia que el horizonte A, cuando fueron tratados con aguas de diferente concentración electrolítica. El análisis de varianza permitió establecer diferencias significativas entre los tratamientos de alta y baja concentración en los tres volúmenes de poros, esto resultados son soportados por los altos valores del coeficiente de dispersión de este horizonte cuando se empleó cada uno de los iones, sin embargo fue evidente un mayor efecto dispersivo en el Magnésico. El hinchamiento o expansión producida por el Mg^{+2} es el mayor mecanismo causante de la desagregación. La ruptura de agregados promueve la dispersión de arcillas por exposición de una mayor superficie al flujo del agua. De otro lado la perdida de agentes cementantes puede incrementar la desagregación y la dispersión de arcillas (Abu-Sharar, *et al* 1987).

Tabla 14 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en el porcentaje de transmitancia y el coeficiente de dispersión de arcillas del horizonte B Magnésico y Cálcico

Concentración Electrolítica mM	Mg++ Vp1 % T		Mg++ Vp2 % T		Mg++ Vp3 % T		Mg++ Coef Ar		Ca++ Vp1 % T		Ca++ Vp2 % T		Ca++ Vp3 % T		Ca++ Coef Ar	
50 MgSO4	87,50	b	90,57	b	92,53	c	46,74	d	88,57	a	91,87	b	94,93	b	39,10	d
50 CaSO4	88,53	a	92,10	a	95,47	a	38,74	e	85,60	b	92,90	b	94,53	b	41,29	d
10 MgSO4	85,73	c	89,93	b	93,70	b	62,73	c	85,20	b	94,33	a	97,80	a	51,23	c
10 CaSO4	87,23	b	90,07	b	94,20	b	64,31	c	84,73	b	94,53	a	96,97	a	50,72	c
2 MgSO4	46,87	f	68,13	d	86,73	e	85,60	b	72,37	d	86,93	c	90,90	c	80,56	b
2 CaSO4	68,10	d	74,07	c	88,93	d	88,43	b	76,43	c	88,17	c	91,80	c	78,48	b
0,5 MgSO4	45,13	g	58,23	f	70,30	g	92,70	b	64,37	f	74,93	e	81,03	e	83,50	b
0,5 CaSO4	58,77	e	65,20	e	73,33	f	90,10	b	69,13	e	81,57	d	85,40	d	81,89	b
Vza	ND		ND		ND		154,01	a	ND		ND		ND		129,26	a

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

- Capacidad de Retención de Humedad

En las figuras 3 y 4 se observan los resultados de la capacidad de retención de humedad ambos horizontes saturados con Mg^{+2} y Ca^{+2} después de la aplicación de agua de diferente concentración electrolítica, se obtuvieron variaciones en todos los puntos de tensión de humedad con diferencias altamente significativas entre los tratamientos.

- Efecto de la concentración electrolítica del agua

De forma general, se observó que en los puntos de tensión analizados, la humedad retenida disminuyó una vez la concentración electrolítica del agua lixiviante se aumentó hasta 10 mM, mostrando un agregamiento del suelo debido a un mayor efecto reemplazante sobre Mg^{+2} y Ca^{+2}, los cuales en altas concentraciones están reduciendo el radio de los capilares y elevando la curva de succión (Figuras 3 y 4); sin embargo, utilizando aguas de 50 mM, se redujo la

retención de humedad frente 10 mM con $MgSO_4$ o respondió igual que 10 mM con $CaSO_4$. Este cambio está indicando que 10 mM fue un nivel crítico de salinidad en el agua de riego para la mayoría de los tratamientos cuando el suelo está en alto estado de saturación de bases, ya que por encima de él, el $MgSO_4$ saca demasiado Ca^{+2} y el $CaSO_4$, demasiado Mg^{+2} que pueden obturar los capilares como cristales de carbonato en los sitios donde aumenta la presión del CO_2 por efecto biótico (Dorronsoro, C. 2009), y por debajo de él, se está eliminando menos Ca^{+2} y Mg^{+2} del que se necesita para recobrar la condición de floculación inicial. La concentración de Ca^{+2} y Mg^{+2} de los efluentes y los coeficientes de dispersión encontrados, están corroborando parcialmente lo expuesto (Tablas 9 a la 14).

Resultados similares encontraron Jayawardane y Beattie (1979) al aumentar la concentración electrolítica del agua aplicada disminuye la capacidad de retención de humedad de los suelos. Con la aplicación de aguas de baja concentración electrolítica se presenta dispersión de los suelos, perdida del tamaño de los agregados y un aumento del volumen de poros más pequeños, originando una mayor retención de agua por el suelo. Bresler et al (1982), encontraron resultados similares pues indican que a una tensión de humedad dada, el contenido de humedad del suelo aumentó al disminuir la concentración de sales de la solución del suelo (Figuras 3 y 4)

La excepción ocurrió en el horizonte B al utilizar $CaSO_4$, tanto en Magnésico como en Cálcico, ya que el nivel crítico fue claramente 50mM (Figura 4), lo que demostró que al ser más gruesa la textura, disminuyó el riesgo de taponamiento de poros, y se pudo eliminar más Mg^{+2} para alcanzar una mejor floculación con aguas de mayor concentración (Tablas 13 y 14).

Pla (1979), desarrolló una clasificación de aguas de riego basada en los requerimientos de sales totales del cultivo y la correspondiente RAS, las propiedades físicas del suelo, y la calidad del agua de riego, que permite establecer el requerimiento de riego (LR) necesario para mantener floculadas las arcillas y gozar de mejores condiciones físicas. En este sistema de clasificación, se establecieron concentraciones críticas en el agua de riego de 10 y 30 me/L para bicarbonato de Ca+Mg y sulfatos de Ca, respectivamente, por debajo de las cuales estas sales se encuentran disociadas.

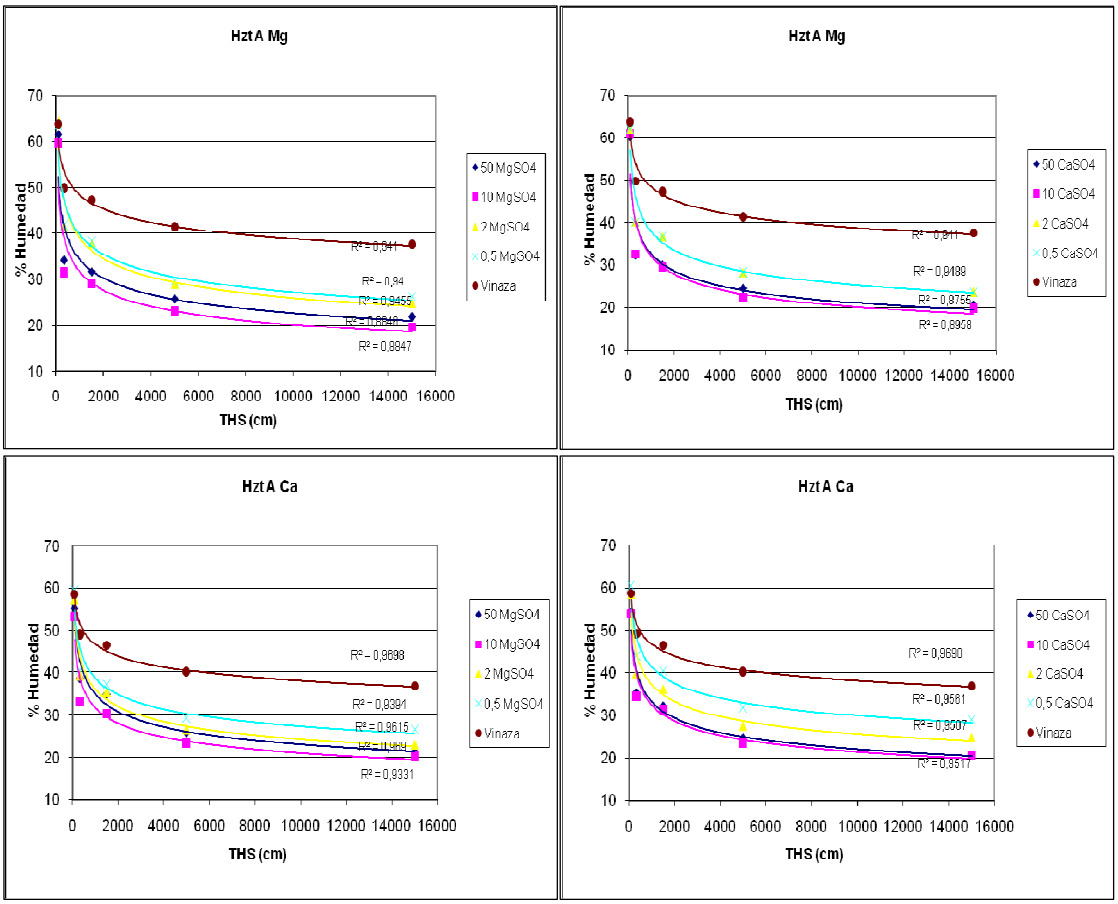
- Suelo magnésico vs cálcico

Los valores de humedad fueron estadísticamente semejantes a los cálcicos, y en las figuras se puede apreciar que en general esto ocurrió en los diferentes puntos de succión, debido a que los dos suelos fueron saturados con sales de cloruro hidrosolubles que les permitirá responder en forma muy similar al lavado. La vinaza por ser un compuesto de alta concentración electrolítica y alta M.O., sales de Mg^{+2} y Ca^{+2}, no fue adecuada para lavar, y por lo tanto, aportó un alto valor de retención de humedad a mayor succión (Figuras 3 y 4).

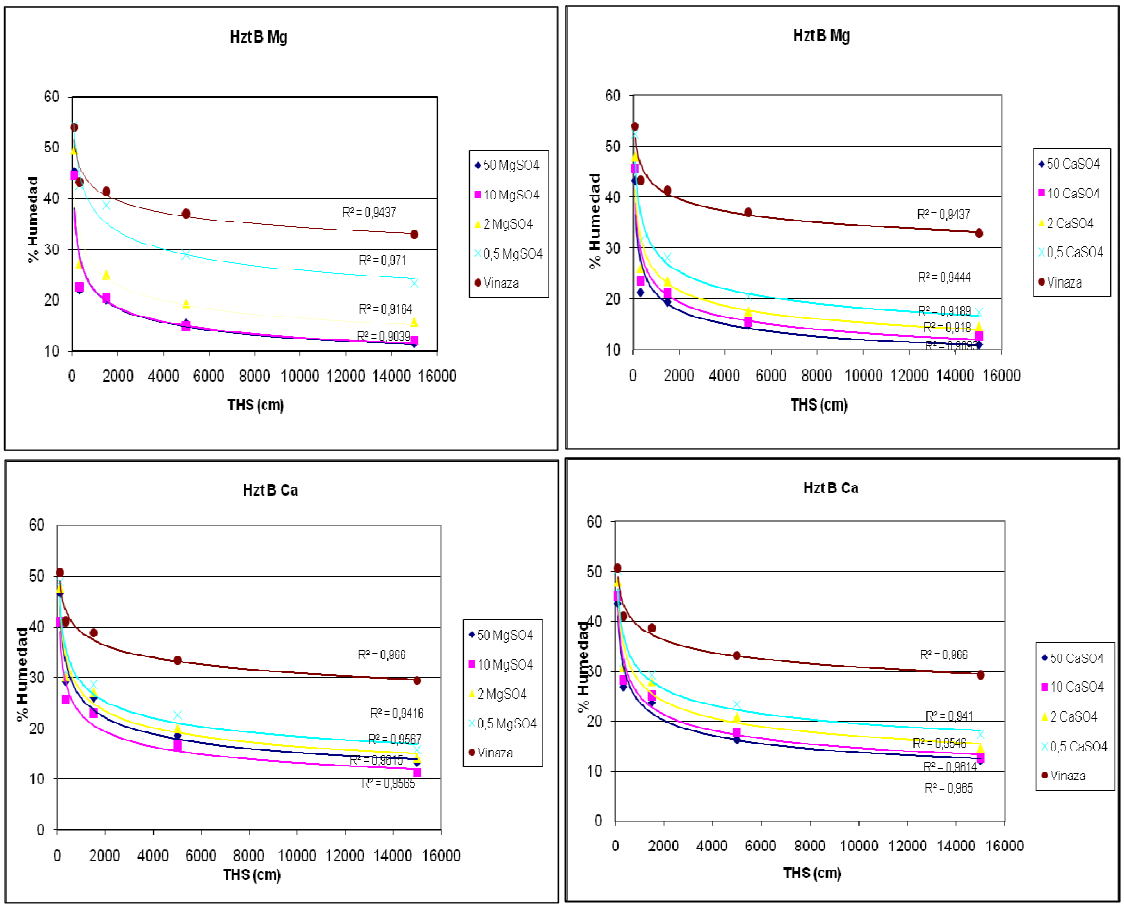
- Efecto de la sal en el agua: agua magnésica vs la cálcica

Debido a la hidrosolubilidad y alta conductividad eléctrica del $MgSO_4$, las aguas de riego enriquecidas en diferentes concentraciones con esta sal, fueron la mayoría de veces más eficaces que las enriquecidas con $CaSO_4$ para mejorar la retención de agua, con curvas más pronunciadas o porcentajes de humedad más bajos en

cada punto de retención (Figuras 3 y 4). La excepción se dio en el horizonte B magnésico, donde fueron prácticamente iguales e incluso mejoró a la concentración de 0.5mM, posiblemente porque el yeso encontró más fácil el desplazamiento del Mg^{+2} al haber menor presencia de coloides o arcillas en este horizonte (Tablas 9,10,11,12).



Fígura 3 Efecto del lavado con aguas de diferente concentración electrolítica y tipo de sal, SO_4Mg (Izq) y SO_4Ca (Der) en la capacidad de retención de humedad del Hzt A Magnésico (arriba) y Cálcico (abajo)



Fígura 4 Efecto del lavado con aguas de diferente concentración electrolítica y tipo de sal, SO_4Mg (Izq) y SO_4Ca (Der) en la capacidad de retención de humedad del Hzt B Magnésico (arriba) y Cálcico (abajo)

- Limites de Plasticidad

En la tabla 15 se presenta la variación de los límites de plasticidad y el índice de plasticidad, del Horizonte A Magnésico o Cálcico, por efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica. Para este horizonte en ambas saturaciones se observó una disminución en los valores de los límites a medida que se incrementó la concentración electrolítica del agua de riego lo cual no es muy buena noticia para la recuperación de suelos expandidos o dispersos, sin embargo los índices de plasticidad disminuyeron cuando se incremento la concentración electrolítica, Marulanda y García (1994) encontraron la misma tendencia en la recuperación de suelos sódicos con aguas de diferente concentración electrolítica, esto en términos prácticos hace que el suelo sea más fácilmente mecanizable. Los horizontes Magnésicos presentaron valores en los índices de plasticidad estadísticamente más altos que los Cálcicos, la diferencia en los efectos sobre las propiedades del suelo son originados desde las propiedades químicas de ambos iones. Caso particular fue el de la vinaza que produjo las valores mas bajos de índice de plasticidad tanto en condiciones Magnésicas como Cálcicas, puesto que las vinazas poseen una elevada concentración electrolítica, generando una alternativa en la recuperación de suelos con saturaciones excesivas de Mg^{+2} (García y Rojas, 2006).

Tabla 15 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la plasticidad del horizonte A Magnésico o Cálcico

Concentración Electrolítica mM	Mg++						Ca++					
	Limite Liquido		Limite Plástico		Indice Plásticidad		Limite Liquido		Limite Plástico		Indice Plásticidad	
	%											
50 MgSO4	36,628	**d**	23,643	**cd**	12,985	**bcd**	34,992	**c**	25,154	**cd**	9,837	**bc**
50 CaSO4	35,357	**d**	22,751	**cd**	12,606	**bcd**	35,053	**c**	25,293	**cd**	9,761	**bc**
10 MgSO4	35,151	**e**	23,053	**cd**	12,099	**cd**	34,084	**c**	24,100	**d**	9,985	**bc**
10 CaSO4	34,951	**e**	22,276	**d**	12,675	**bcd**	31,189	**d**	21,918	**e**	9,271	**bc**
2 MgSO4	38,136	**c**	24,139	**cd**	13,997	**abc**	37,116	**b**	24,014	**d**	13,102	**a**
2 CaSO4	37,968	**c**	23,772	**cd**	14,196	**ab**	37,145	**b**	25,197	**cd**	11,948	**ab**
0,5 MgSO4	40,019	**a**	24,444	**b**	15,574	**a**	39,180	**a**	25,972	**bc**	13,208	**a**
0,5 CaSO4	39,029	**b**	24,647	**b**	14,382	**ab**	40,631	**a**	29,168	**a**	11,463	**ab**
Vza	37,635	**c**	26,070	**a**	11,566	**d**	35,232	**c**	27,484	**b**	7,748	**c**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

En la tabla 16 se presenta la variación de los límites de plasticidad y el índice de plasticidad, del Horizonte B Magnésico o Cálcico, por efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica. Para este horizonte en ambas saturaciones al igual que el horizonte anterior se observó una disminución en los valores del límite líquido y plástico a medida que se incrementó la concentración electrolítica del agua de riego. Sin embargo los porcentajes de humedad de los parámetros evaluados en este horizonte fueron menores debido a su menor cantidad de arcilla, CIC y M.O (Tablas 5 y 6) sin embargo el lavado con aguas de diferente concentración electrolítica no generó diferencias significativas en el tratamiento con Mg^{+2}, situación que si se presentó con el Ca^{+2} en este horizonte. De otro lado la vinaza también produjo los menores índices de plasticidad.

Tabla 16 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la plasticidad del horizonte B Magnésico o Cálcico

Concentración Electrolítica mM	Mg++						Ca++					
	Limite Liquido		Limite Plástico		Indice Plásticidad		Limite Liquido		Limite Plástico		Indice Plásticidad	
	%											
50 MgSO4	26,424	**d**	18,742	**e**	7,682	**a**	28,594	**d**	19,068	**bcd**	9,526	**c**
50 CaSO4	25,903	**d**	18,570	**e**	7,333	**a**	26,695	**e**	17,157	**d**	9,538	**c**
10 MgSO4	26,551	**d**	19,780	**de**	6,771	**a**	25,385	**e**	19,163	**bcd**	6,222	**de**
10 CaSO4	26,971	**d**	20,277	**de**	6,694	**a**	26,783	**e**	18,022	**cd**	8,761	**c**
2 MgSO4	29,865	**c**	20,848	**cd**	9,017	**a**	29,528	**c**	20,789	**b**	8,739	**cd**
2 CaSO4	30,666	**bc**	22,170	**bc**	8,496	**a**	31,079	**b**	21,151	**b**	9,928	**b**
0,5 MgSO4	31,000	**bc**	22,862	**b**	8,138	**a**	32,076	**a**	20,352	**bc**	11,724	**b**
0,5 CaSO4	31,773	**b**	22,466	**bc**	9,307	**a**	32,373	**a**	19,467	**bcd**	12,906	**a**
Vza	32,633	**a**	24,900	**a**	7,733	**a**	30,048	**c**	25,089	**a**	4,959	**e**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

- Estabilidad de Agregados.

De acuerdo a los datos obtenidos en las tablas 17,18,19 y 20 correspondientes a los Horizontes A y B Magnésicos o Cálcicos respectivamente se observó que el índice de estabilidad estructural (IEA) fue significativamente más alto para el horizonte A que para el Hzt B tanto en condiciones Magnésicas o Cálcicas . Esto puede ser debido al mayor contenido de arcillas y M.O del horizonte A, generalmente la estabilidad de agregados de un suelo se incrementa con el contenido de arcilla. Más agregados estables al agua del horizonte A resultaron en un más alto diámetro medio ponderado (DMP). En condiciones Cálcicas el (DMP) de ambos horizontes tiende a ser más alto, además existieron diferencias significativas (P=0,05) en todas las soluciones de lavado de diferente concentración electrolítica.

Para ambos suelos el mayor porcentaje de agregados se encontró en el grupo de los menores de 0,25 mm, siendo estos valores mayores en los suelos Magnésicos que con Cálcicos, mientras que el resto de tamaños de agregados fueron consistentemente menores, evidenciando en cierto grado dispersión de arcillas, sin embargo esta dispersión fue prevenida y los agregados fueron mejor conservados cuando se introdujo agua de alta concentración electrolítica igual o superior a 10 mM, mientras que la dispersión y una marcada desagregación se presentó con los tratamientos de baja concentración electrolítica, por consiguiente presentaron los valores más bajos del (IEA) y (DMP), estos resultados indican que un hinchamiento o dispersión de arcillas se presentó. Esto se debe por que al aplicar aguas de baja concentración electrolítica se presenta dispersión de las arcillas y se incrementa el rompimiento de los agregados del suelo, Shainberg y Letey (1984). En general el hinchamiento es causado por hidratación de la superficie de las arcillas y el intercambio de cationes, y una presión osmótica debido a un gradiente de concentración entre la doble capa difusa (DCD) y la solución del suelo (Viani et al., 1983;Rengasamy y Olsson, 1991) (Tablas16, 17, 18, 19 y 20)(Figuras 5 y 6).

En el Horizonte A Magnésico o Cálcico se presentaron diferencias significativas entre las soluciones de mayor concentración y las de baja concentración existiendo porcentajes más altos de agregados mayores de 2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25 mm en las primeras, esto indica que la concentración electrolítica del agua aplicada produjo cambios significativos en el porcentaje de estos agregados, estos resultados indican que posiblemente ocurrió una expansión significativa de las arcillas dando lugar a un proceso de dispersión y destrucción de agregados que puede presentarse cuando la concentración electrolítica esta por debajo de los valores de concentración critica de floculación (CCF) del suelo Zhang and Norton 2002, la vinaza fue el solución con los valores significativamente más altos en los

dos tratamientos de este horizonte, como ya se había mencionado anteriormente el alto poder floculante y sus elevados contenidos de M.O. posiblemente produjeron tales efectos. (Tabla 17 y 18).

Tabla 17 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Horizonte A Magnésico

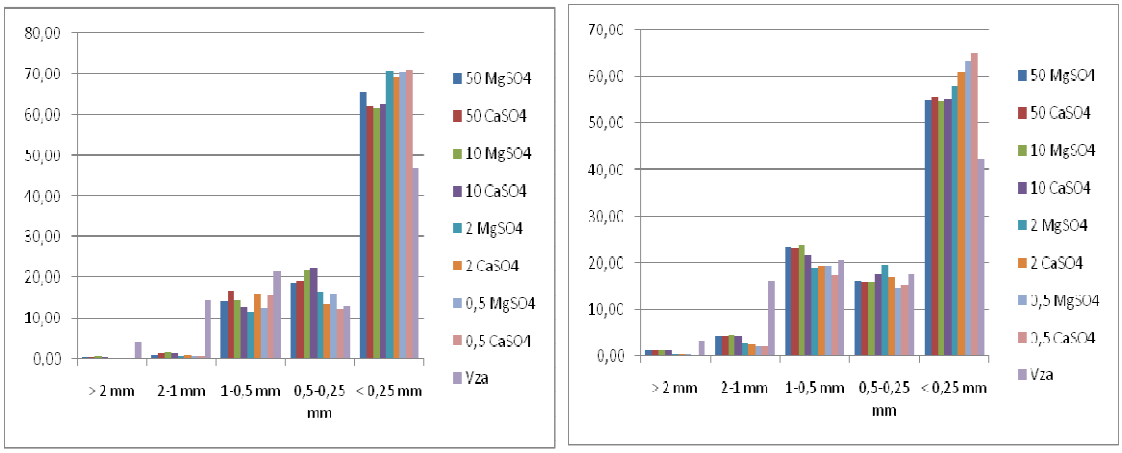
	Suelo 1 Mg++													
Concentración	> 2 mm		2-1 mm		1-0,5 mm		0,5-0,25 mm		< 0,25 mm		IEA		DMP	
Electrolítica mM	%													
50 MgSO4	0,442	**d**	1,174	**cd**	14,162	**c**	18,681	**b**	65,541	**c**	0,516	**c**	0,278	**d**
50 CaSO4	0,592	**c**	1,335	**bc**	16,831	**b**	19,144	**b**	62,098	**d**	0,595	**b**	0,301	**b**
10 MgSO4	0,786	**b**	1,518	**b**	14,294	**c**	21,731	**a**	61,670	**d**	0,601	**b**	0,302	**b**
10 CaSO4	0,578	**c**	1,432	**bc**	12,753	**d**	22,518	**a**	62,718	**d**	0,580	**b**	0,288	**c**
2 MgSO4	0,262	**e**	0,786	**e**	11,620	**d**	16,458	**c**	70,875	**a**	0,406	**e**	0,248	**g**
2 CaSO4	0,275	**e**	0,977	**de**	15,971	**b**	13,523	**d**	69,254	**b**	0,438	**d**	0,267	**e**
0,5 MgSO4	0,182	**e**	0,784	**e**	12,512	**d**	16,022	**c**	70,500	**a**	0,415	**de**	0,249	**g**
0,5 CaSO4	0,247	**e**	0,769	**e**	15,840	**b**	12,200	**d**	70,943	**a**	0,405	**e**	0,260	**f**
Vza	4,375	**a**	14,327	**a**	21,477	**a**	12,975	**d**	46,846	**e**	0,952	**a**	0,602	**a**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

Tabla 18 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Horizonte A Cálcico

	Suelo 1 Ca++													
Concentración	> 2 mm		2-1 mm		1-0,5 mm		0,5-0,25 mm		< 0,25 mm		IEA		DMP	
Electrolítica mM	%													
50 MgSO4	1,215	**b**	4,351	**b**	23,274	**ab**	16,188	**bcd**	54,971	**f**	0,780	**bc**	0,388	**bc**
50 CaSO4	1,161	**b**	4,202	**b**	23,096	**ab**	15,826	**cd**	55,715	**e**	0,758	**c**	0,383	**c**
10 MgSO4	1,269	**b**	4,538	**b**	23,874	**a**	15,847	**cd**	54,473	**g**	0,794	**b**	0,395	**b**
10 CaSO4	1,174	**b**	4,322	**b**	21,638	**bc**	17,578	**b**	55,288	**f**	0,771	**bc**	0,381	**c**
2 MgSO4	0,552	**c**	2,859	**c**	19,043	**de**	19,692	**a**	57,854	**d**	0,712	**d**	0,333	**d**
2 CaSO4	0,442	**cd**	2,401	**cd**	19,458	**d**	16,739	**bc**	60,960	**c**	0,629	**e**	0,318	**e**
0,5 MgSO4	0,412	**d**	2,062	**d**	19,453	**d**	14,792	**d**	63,281	**b**	0,570	**f**	0,308	**f**
0,5 CaSO4	0,351	**d**	2,132	**d**	17,356	**ef**	15,142	**cd**	65,020	**a**	0,530	**g**	0,296	**g**
Vza	3,420	**a**	16,196	**a**	20,641	**cd**	17,481	**b**	42,262	**h**	1,189	**a**	0,602	**a**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad



Fígura 5 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Hzt A Magnésico (Izquierda) o Cálcico (Derecha)

En el Horizonte B Magnésico o Cálcico (Tablas 19, y 20, figura 6) se presentaron diferencias significativas entre las soluciones de mayor concentración y las de baja concentración existiendo porcentajes más altos de agregados mayores de 2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25 mm en las primeras, se evidenció además que casi la totalidad de los agregados se encontró en el grupo de los menores de 0.25 mm, estos agregados representan un porcentaje muy alto en el Hzt B Magnésico cercano al 97 %, de la misma forma en el Cálcico se observaron valores máximos del 96.5%, el porcentaje de agregados mayores de 2 mm son muy bajos en este horizonte en ambos tratamientos menores del 1% para todas las soluciones lixiviantes, esto hace que el movimiento del agua en este horizonte sea aun más lento que el anterior a causa de su baja estabilidad.

Tabla 19 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del horizonte B Magnésico

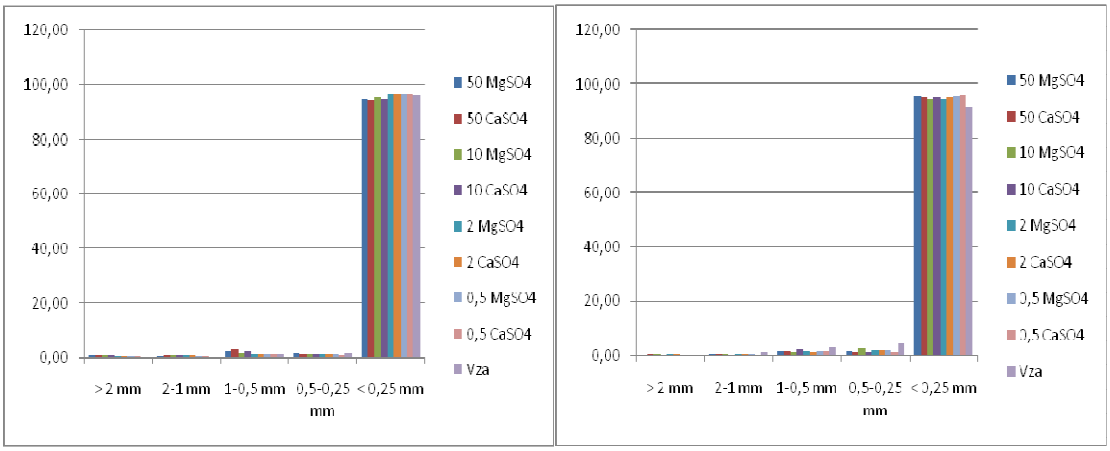
Concentración Electrolítica mM	Suelo 2 Mg++													
	> 2 mm		2-1 mm		1-0,5 mm		0,5-0,25 mm		< 0,25 mm		IEA		DMP	
	%													
50 MgSO4	0,677	**b**	0,487	**bc**	2,450	**b**	1,462	**b**	94,923	**e**	0,046	**b**	0,170	**c**
50 CaSO4	0,823	**a**	0,756	**a**	3,064	**a**	1,215	**bc**	94,142	**f**	0,053	**a**	0,181	**a**
10 MgSO4	0,757	**a**	0,635	**ab**	1,648	**c**	1,270	**bc**	95,690	**d**	0,037	**c**	0,170	**c**
10 CaSO4	0,770	**a**	0,703	**a**	2,473	**b**	1,149	**c**	94,905	**e**	0,045	**b**	0,176	**b**
2 MgSO4	0,459	**d**	0,702	**a**	1,121	**de**	1,053	**cd**	96,664	**b**	0,030	**d**	0,158	**de**
2 CaSO4	0,567	**c**	0,608	**ab**	1,121	**de**	1,108	**cd**	96,595	**b**	0,029	**d**	0,160	**d**
0,5 MgSO4	0,405	**d**	0,405	**c**	1,106	**de**	1,295	**bc**	96,789	**a**	0,029	**d**	0,153	**f**
0,5 CaSO4	0,418	**d**	0,499	**bc**	1,282	**de**	0,877	**de**	96,924	**a**	0,027	**d**	0,154	**ef**
Vza	0,124	**e**	0,220	**d**	1,429	**cd**	1,800	**a**	96,427	**c**	0,036	**c**	0,144	**g**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

Tabla 20 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Hzt B Cálcico

Concentración Electrolítica mM	Suelo 2 Ca++													
	> 2 mm		2-1 mm		1-0,5 mm		0,5-0,25 mm		< 0,25 mm		IEA		DMP	
	%													
50 MgSO4	0,514	**d**	0,608	**cd**	1,515	**cd**	1,677	**d**	95,686	**bc**	0,039	**d**	0,162	**e**
50 CaSO4	0,782	**b**	0,647	**c**	1,753	**c**	1,308	**e**	95,509	**c**	0,039	**d**	0,172	**cd**
10 MgSO4	0,932	**a**	0,918	**b**	1,323	**d**	2,593	**b**	94,234	**e**	0,051	**b**	0,181	**a**
10 CaSO4	0,417	**e**	0,471	**d**	2,517	**b**	1,036	**e**	95,559	**bc**	0,042	**d**	0,161	**e**
2 MgSO4	0,851	**ab**	0,905	**b**	1,405	**d**	2,148	**c**	94,691	**d**	0,047	**c**	0,177	**ab**
2 CaSO4	0,698	**c**	0,805	**b**	1,181	**d**	1,893	**cd**	95,423	**c**	0,040	**d**	0,169	**d**
0,5 MgSO4	0,365	**e**	0,582	**cd**	1,380	**d**	1,799	**d**	95,874	**b**	0,039	**d**	0,156	**f**
0,5 CaSO4	0,404	**e**	0,566	**cd**	1,495	**cd**	1,131	**e**	96,404	**a**	0,033	**e**	0,156	**f**
Vza	0,204	**f**	1,186	**a**	3,135	**a**	4,075	**a**	91,400	**f**	0,092	**a**	0,174	**bc**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad



Fígura 6 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la estabilidad de agregados del Hzt B Magnésico (Izquierda) o Cálcico (Derecha)

El índice de estabilidad se calculó como la relación existente entre los agregados estables al agua, es decir el porcentaje de agregados comprendidos entre los menores de 2 mm más los mayores de 0.25 mm, y los agregados no estables al agua, los mayores de 2 mm mas los menores de 0.25 mm.

De acuerdo con los datos obtenidos en el análisis de varianza se observó que para el Horizonte A saturado con Mg^{+2} al aumentar la concentración electrolítica del agua aplicada aumentó el índice de estabilidad, presentando diferencias significativas entre los tratamientos de alta y baja concentración electrolítica. Además el tratamiento con vinaza presento el IEA de agregados más alto evidenciando el efecto de esta solución en el proceso de recuperación de suelos, promoviendo el lavado del excedente de Mg^{+2} y favoreciendo la estructuración, y estabilidad de agregados (García y Rojas, 2006).

- Conductividad Hidráulica.

El promedio de los valores de conductividad hidráulica (Ks), fueron generalmente más grandes para el tratamiento Cálcico que para el Magnésico en ambos suelos (Tablas 21,22, Fig 7 y 8). Esta aparente tendencia puede ser atribuida a las diferencias en los potenciales de hidratación (Hinchamiento) entre los dos iones. Moutier et al. (1998) reportaron una situación similar y le atribuyen este incremento al desarrollo de enlaces cohesivos entre las partículas de arcilla durante la lixiviación (termino usado por los autores como reagregación).

Basado en la teoría de la reagregación, nueva estructura del suelo resultado de la formación de los enlaces cohesivos pueden haber sido desarrollados cuando los suelos fueron lixiviados con soluciones de concentración electrolítica igual o superior a 10 mM. El mayor incremento en los suelos Cálcicos, indica que el Ca^{++} favorece la formación de enlaces debido a su menor radio de hidratación (Zhang y Norton, 2002). Sin embargo en ambos horizontes sin importar el tratamiento, la Ks exhibió un descenso en sus valores cuando la concentración electrolítica del agua lixiviante fue menor a 10 mM (Tablas 21 y 22, Figuras 7 y 8).

Ambos Horizontes Magnésicos o Cálcicos presentaron variaciones en los valores de conductividad hidráulica (Ks), además existieron diferencias en dicho parámetro por efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica. Las pruebas de comparación indican que se presentaron diferencias significativas en casi todas las soluciones de alta y baja concentración electrolítica en los volúmenes de poros.

El horizonte A Magnésico o Cálcico (Tabla 21, Fig 7) presentó una rápida disminución de la Ks después de la utilización de de soluciones de 0,5 mM, el rápido descenso de la Ks acompañada de una disminución de los valores de transmitancia (%T) indican una acelerada dispersión e arcillas, estos resultados sugieren que el continuo hinchamiento de las arcillas resultando en desagregación fueron los responsables de la reducción de la Ks en esta etapa. Viani et al. (1983) midió la presión de hinchamiento y la distancia de las intercapas de la montmorillonita, y concluyo que la hidratación superficial de las capas de esta arcilla fue la mayor fuerza causante del hinchamiento de las intercapas. El hinchamiento osmótico prevalece cuando los paquetes de arcilla están más separados y su doble capa más diluida. El excesivo hinchamiento osmótico debido a una baja concentración electrolítica en la solución podría conducir a la dispersión de arcillas. La Hidratación por cationes puede tener lugar cerca de la superficie de la arcilla o en la solución, sin embargo la distancia varia de acuerdo a la hidratación del catión, una vez ocurrido el hinchamiento se incrementa la proporción de poros pequeños lo cual reduce la Ks.

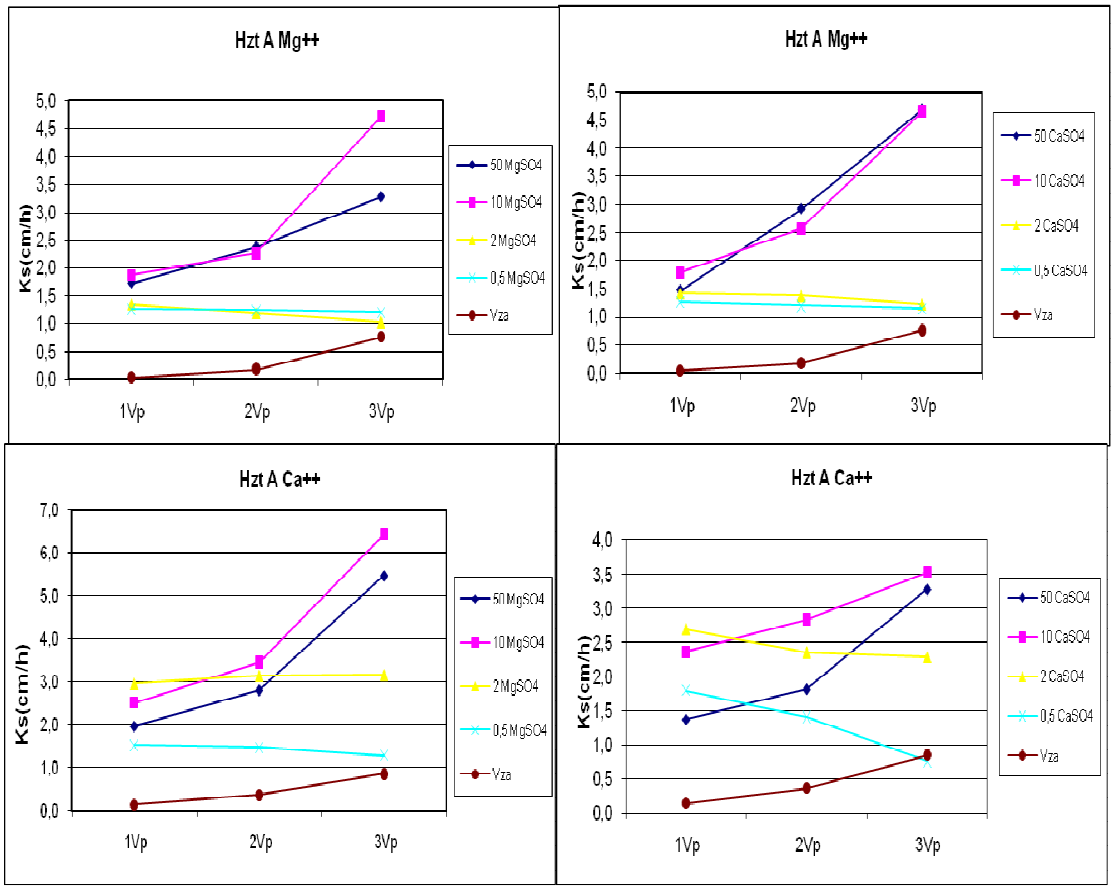
Sin embargo el tratamiento con vinaza presento valores de Ks muy pequeños debido tal vez a la viscosidad de esta sustancia pero aumentó su valor de Ks con respecto a su valor inicial esto indica que este tipo de sustancia también posee una concentración electrolítica elevada aunque cabe destacar que en general sus valores son significativamente menores comparados con los demás tratamientos, puesto que las vinazas poseen una elevada concentración de electrolitos y estos tienen un reconocido efecto floculante, independientemente de su poder fertilizante, se pueden utilizar para promover una mejor agregación de suelos pesados, estructuralmente degradados o con problemas de permeabilidad. (Garcia y Rojas, 2006).

Estos resultados sugieren que al aumentar la concentración electrolítica en las aguas aplicadas se mejora la conductividad hidráulica debido a una mejor agregación del suelo producto de un aumento de los macroporos y mesoporos ya que estos constituyen el sistema principal de drenaje, sin embargo para los tratamiento de menor concentración electrolítica el movimiento del agua es más lento ya que son los microporos los que predominan en el sistema.

Tabla 21 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte A Magnésico o Cálcico

Concentación electrolítica mM	Suelo 1 Mg++ Ks (cm/h)						Suelo 1 Ca++ Ks (cm/h)					
	1Vp		2Vp		3Vp		1Vp		2Vp		3Vp	
50 MgSO4	1,7263	**c**	2,3704	**c**	3,2698	**b**	1,9601	**e**	2,8067	**c**	5,4693	**b**
50 CaSO4	1,4688	**d**	2,9221	**a**	4,6910	**a**	1,3691	**h**	1,8167	**e**	3,2840	**d**
10 MgSO4	1,8767	**a**	2,2624	**d**	4,7095	**a**	2,5099	**c**	3,4463	**a**	6,4290	**a**
10 CaSO4	1,7877	**b**	2,5642	**b**	4,6395	**a**	2,3665	**d**	2,8372	**c**	3,5305	**c**
2 MgSO4	1,3498	**f**	1,1876	**g**	1,0308	**d**	2,9509	**a**	3,1366	**b**	3,1556	**e**
2 CaSO4	1,4163	**e**	1,3720	**e**	1,2220	**c**	2,6922	**b**	2,3521	**d**	2,2828	**f**
0,5 MgSO4	1,2566	**g**	1,2393	**f**	1,2019	**c**	1,5197	**g**	1,4669	**f**	1,2790	**g**
0,5 CaSO4	1,2622	**g**	1,2007	**g**	1,1524	**c**	1,7926	**f**	1,4063	**f**	0,7584	**j**
Vza	0,0346	**h**	0,1776	**i**	0,7591	**e**	0,1393	**i**	0,3626	**h**	0,8479	**i**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad



Fígura 7 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte A Magnésico (Arriba) o Cálcico (Abajo)

Van Olphen (1977); El-Swaify, 1976; Greene et al, (1978). Shainberg y Letey (1984) citados por Garcia (2002) indican que cada material arcilloso tiene un valor de floculación característico que depende de la valencia del catión dominante es así como estos investigadores muestran que los suelos con arcillas illíticas son más sensibles a la dispersión que aquellos que exhiben arcillas montmorilloníticas. En el caso de los suelos del Valle del Río Cauca se tiene una mezcla de estas

arcillas con otras como la vermiculita, la clorita y la caolinita con contenidos variables dependiendo de su ubicación y de la magnitud de los procesos de formación. Muchos Mollisoles, que exhiben excelentes propiedades físicas, químicas y biológicas, tienen cantidades apreciables de Illita, lo que hace que se deban considerar frágiles y poco tolerantes a procesos que puedan alterar dichas condiciones.

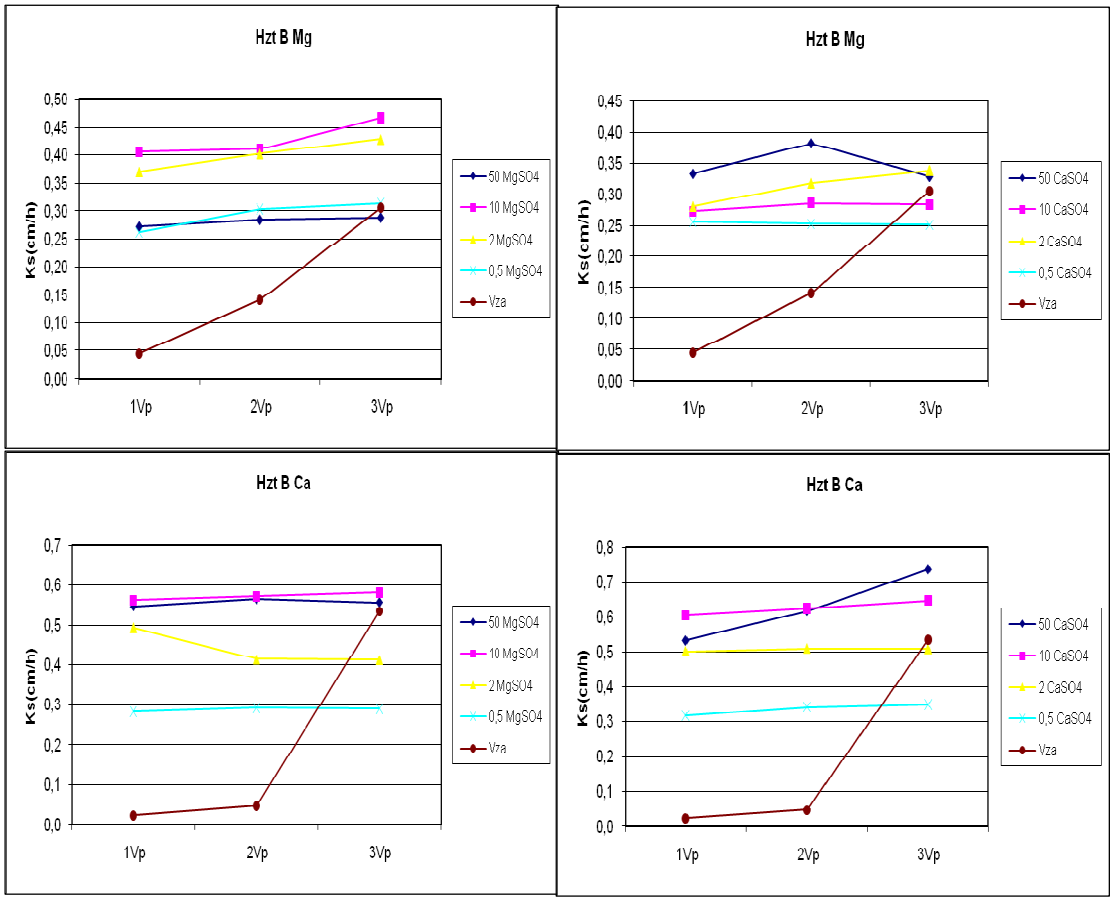
En el horizonte B Magnésico o Cálcico (Tabla 22, Fig 8) las pruebas de comparación indicaron diferencias significativas entre todos los tratamientos en los tres volúmenes de poros, siendo las soluciones de alta concentración electrolítica los que presentaron mayores valores de Ks. Al igual que en el horizonte anterior esta disminución de la Ks cuando se utilizo aguas de baja concentración electrolítica estuvo correlacionada con una disminución en los valores de transmitancia y un aumento en el coeficiente de dispersión de arcillas. McNeal et al (1966) citado por Zhang y Norton (2002), sugieren que la reducción de la conductividad hidráulica se debe principalmente al hinchamiento de las arcillas del suelo mientras que Shainberg et al, (1981) sugiere que se produce una dispersión de arcillas con un subsiguiente taponamiento de los poros conductores ya sea por un sellamiento in situ de minerales o por migración de arcillas las cuales se acumulan y disminuyen el tamaño de los poros. Keren y Singer (1988) indican que el sellamiento y la dispersión de arcillas son los dos mecanismos responsables de la reducción de la Ks, el primero es un proceso continuo que incrementa gradualmente con la disminución de la concentración de la solución, pero la dispersión de las arcillas solamente es posible cuando la concentración de la solución es menor que el valor de floculación.

El tratamiento con vinaza aumentó sus valores de Ks paulatinamente con el avance del proceso de lavado, esto se debe posiblemente a que este tipo de sustancia también posee una concentración electrolítica elevada, en este suelo los valores de este tratamiento aunque difieren estadísticamente de los demás no se encuentran tan alejados de los tratamientos de mayor concentración electrolítica situación que si se presento en el horizonte A (Tablas 21 y 22).

Tabla 22 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte B Magnésico o Cálcico

Concentración Electrolítica mM	Suelo 2 Mg++ Ks (cm/h)						Suelo 2 Ca++ Ks (cm/h)					
	1Vp		2Vp		3Vp		1Vp		2Vp		3Vp	
50 MgSO4	0,2727	**e**	0,2840	**f**	0,2879	**e**	0,5479	**c**	0,5668	**b**	0,5585	**d**
50 CaSO4	0,3332	**c**	0,3823	**c**	0,3288	**c**	0,5327	**d**	0,6187	**a**	0,7376	**a**
10 MgSO4	0,4065	**a**	0,4118	**a**	0,4668	**a**	0,5640	**b**	0,5736	**b**	0,5820	**c**
10 CaSO4	0,2728	**e**	0,2859	**f**	0,2836	**e**	0,6062	**a**	0,6264	**a**	0,6483	**b**
2 MgSO4	0,3704	**b**	0,4021	**b**	0,4291	**b**	0,4929	**f**	0,4143	**d**	0,4130	**g**
2 CaSO4	0,2806	**d**	0,3184	**d**	0,3385	**c**	0,5024	**e**	0,5104	**c**	0,5091	**f**
0,5 MgSO4	0,2629	**f**	0,3036	**e**	0,3140	**d**	0,2830	**h**	0,2920	**f**	0,2897	**i**
0,5 CaSO4	0,2557	**g**	0,2529	**g**	0,2513	**f**	0,3171	**g**	0,3431	**e**	0,3504	**h**
Vza	0,0451	**h**	0,1406	**h**	0,3048	**d**	0,0233	**i**	0,0472	**g**	0,5337	**e**

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad



Fígura 8 Efecto de la aplicación de aguas de diferente concentración electrolítica en la conductividad hidráulica del Horizonte B Magnésico (Arriba) o Cálcico (Abajo)

4.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS FINALES DE LOS SUELOS

En las tablas 23, 24, 25 y 26 se indican algunas de las características químicas finales de los horizontes después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica.

4.4.1 Horizonte A

Los lavados de Mg^{+2} en Magnésico y de Ca^{+2} en Cálcico no fueron suficientes para volver a la condición de partida, probablemente por el grado de sobresaturación en que se encontraba cada elemento, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se infiere que se requiere de más lavado, y se confirma que con una concentración de 50 mM de sales en el agua de riego se pueden lograr estos objetivos (Tabla 5, 23 y 24).

En cambio, cuando se lavó Ca^{+2} en Magnésico y Mg^{+2} en Cálcico, los tres lavados realizados fueron excesivos como se puede deducir al comparar los valores finales con los iníciales, aún con una concentración de 0.5 mM, la cual de todas formas pareció la más indicada en estos casos. Estas respuestas se produjeron seguramente porque el catión dominante en cada caso por ley de acción de masas debilita la adherencia del contrario, con lo que se hace más fácil su lavado (Bonh et al 1979).

En cuanto a pH, CE y CIC se puede afirmar que prácticamente quedaron como al comienzo, aunque que con algunas diferencias estadísticas. El pH se acidificó ligeramente en forma temporal como tenía que suceder por la calidad de las sales usadas en el agua de riego y por los efectos del lavado.

Tabla 23 Características químicas finales del horizonte A Magnésico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica

Concentración Electrolítica mM	pH	C.E.	CIC	Mg	Concentración Electrolítica mM	pH	C.E.	CIC	Ca
		dS/m	meq/100 g suelo				dS/m	meq/100 g suelo	
50 CaSO4	6,13 d	8,86 b	18,20 b	7,2 d	50 MgSO4	6,25 a	7,92 c	17,89 c	9,7 d
10 CaSO4	6,21 c	6,60 d	17,80 c	7,5 c	10 MgSO4	6,39 a	7,25 d	18,74 b	10,9 b
2 CaSO4	6,42 b	5,22 e	16,95 d	7,7 c	2 MgSO4	6,40 a	4,32 e	17,17 d	10,0 c
0,5 CaSO4	6,65 a	8,50 c	17,01 d	9,2 b	0,5 MgSO4	6,38 a	8,22 b	16,67 e	10,9 b
Vza	4,73 e	25,10 a	19,77 a	17,4 a	Vza	4,73 b	25,10 a	19,77 a	27,8 a

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

Tabla 24 Características químicas finales del horizonte A Cálcico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica

Concentración Electrolítica mM	pH	C.E.	CIC	Mg	Concentración Electrolítica mM	pH	C.E.	CIC	Ca
		dS/m	meq/100 g suelo				dS/m	meq/100 g suelo	
50 CaSO4	6,20 a	5,63 d	18,70 b	3,5 d	50 MgSO4	6,24 a	8,09 e	18,40 b	13,2 e
10 CaSO4	6,18 a	7,59 c	18,87 b	3,1 e	10 MgSO4	6,23 a	9,52 b	18,19 c	17,6 b
2 CaSO4	6,09 a	7,69 c	17,24 c	4,5 b	2 MgSO4	6,27 a	9,07 c	17,47 d	16,4 c
0,5 CaSO4	6,23 a	8,34 b	16,70 d	4,0 c	0,5 MgSO4	6,13 a	8,65 d	17,13 e	15,6 d
Vza	4,76 b	22,03 a	19,21 a	13,5 a	Vza	4,76 b	22,03 a	19,21 a	50,3 a

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

4.4.2 Horizonte B

Los lavados de Mg^{+2} en Magnésico o en Cálcico no fueron suficientes ya que no se alcanzaron sus niveles originales y por lo tanto se requiere más lavado; por otra parte, según los resultados obtenidos una pequeña concentración de 0.5 mM de sales en el agua de riego se puede lograr este objetivo en este suelo de menor capacidad búffer (Tablas 5, 25 y 26).

Así mismo, los lavados de Ca^{+2} en Magnésico o en Cálcico lograron alcanzar el valor inicial, siempre y cuando se realizaran los lavados con aguas concentradas mínimamente a 0.5 mM, en cualquier caso. En cuanto a pH, CE y CIC se puede afirmar lo mismo que para el horizonte A, que prácticamente quedaron como al comienzo, sin importar las diferencias estadísticas. El pH se acidificó ligeramente con las concentraciones más altas en forma temporal, como tenía que suceder por la calidad de las sales usadas en el agua de riego y por los efectos del lavado.

Tabla 25 Características químicas del horizonte B Magnésico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica

Concentración Electrolítica mM	pH	C.E.	CIC	Mg	Concentración Electrolítica mM	pH	C.E.	CIC	Ca
		mS/cm	meq/100 g suelo				mS/cm	meq/100 g suelo	
50 CaSO4	7,59 d	2,95 b	6,87 b	6,6 b	50 MgSO4	7,67 d	3,76 b	7,01 b	5,4 b
10 CaSO4	7,75 c	1,71 c	6,94 b	3,1 d	10 MgSO4	7,88 c	1,38 c	7,10 b	3,8 d
2 CaSO4	8,08 b	0,71 d	6,42 c	3,4 c	2 MgSO4	8,15 b	0,58 d	6,85 c	4,4 c
0,5 CaSO4	8,26 a	0,39 e	6,41 c	3,2 d	0,5 MgSO4	8,29 a	0,42 e	6,38 d	4,0 d
Vza	4,61 e	26,06 a	7,50 a	16,6 a	Vza	4,61 e	26,06 a	7,50 a	11,4 a

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

Tabla 26 Características químicas del horizonte B Cálcico después del tratamiento con aguas de diferente concentración electrolítica

Concentración Electrolítica mM	pH	C.E. mS/cm	CIC meq/100 g suelo	Mg	Concentración Electrolítica mM	pH	C.E. mS/cm	CIC meq/100 g suelo	Ca
50 CaSO4	7,55 c	2,64 b	7,00 a	1,3 b	50 MgSO4	7,69 c	5,34 b	6,97 ab	4,9 d
10 CaSO4	7,62 c	2,37 c	7,04 a	0,9 c	10 MgSO4	7,79 c	2,04 c	6,92 ab	6,0 b
2 CaSO4	7,89 b	0,80 d	6,81 b	1,1 c	2 MgSO4	7,94 b	0,56 d	6,79 ab	6,1 b
0,5 CaSO4	8,13 a	0,41 e	6,53 b	1,1 c	0,5 MgSO4	8,13 a	0,37 d	6,69 b	5,9 c
Vza	4,78 d	24,54 a	7,38 a	10,3 a	Vza	4,78 d	24,54 a	7,38 a	17,3 a

Nota: Promedios identificados con la misma letra en sentido vertical no presenta diferencias significativas al nivel del 5% de probabilidad

Ambos suelos mostraron mayor grado de preferencia del Ca^{+2} sobre el Mg^{+2}, el grado de saturación de Ca^{+2} en el Cálcico fue mayor que la saturación de Mg^{+2} en el Magnésico, sin embargo en ambos suelos esto no se cumplió cuando se lixivio con $MgSO_4$ a una concentración de 50 mM, no obstante si esta preferencia sobre el Ca^{+2} no hubiese existido el efecto especifico del Mg^{+2} podría haber sido más grande (Zhang y Norton, 2002).

Para ambos suelos las concentraciones de Mg^{+2} y Ca^{+2} intercambiable varían de acuerdo a la concentración de dicho elemento en el agua de lixiviado. Al aumentar la concentración electrolítica se logró mejorar la conductividad hidráulica realizando un lavado del ión que se encontraba en alta concentración, reemplazándolo por calcio o magnesio o simplemente aumentando la concentración electrolítica de la solución del suelo haciendo que la doble capa difusa se contraiga produciendo agregación.

5. CONCLUSIONES.

La saturación de los dos primeros horizontes de un suelo, de alta capacidad de uso del Valle del Cauca, con estos dos iones (Mg o Ca) produjo una degradación de las propiedades físicas y químicas.

Existió un efecto específico del Mg^{++} significativamente mas acentuado, comparado con el Ca^{++}, sobre la estabilidad estructural, la dispersión de acillas y la conductividad hidráulica (Ks) para los dos horizontes estudiados con contenido de vermiculita, montmorillonita. La reducción de la Ks fue mayor cuando los horizontes fueron saturados con Mg^{++}.

Básicamente el mayor efecto negativo del Mg^{++} sobre la estabilidad estructural y la conductividad hidráulica fue debido a la mayor energía de hidratación y al mayor radio de hidratación, produciendo más expansión (hinchamiento) de las arcillas.

La dispersión de arcillas y su posterior desprendimiento junto con el taponamiento de poros, complementando la expansión y la desagregación fueron los procesos que en mayor medida redujeron la Ks.

La recuperación de estos suelos mediante lavado no fue fácil, en el horizonte A cuando se trató de sacar al Mg en Magnésico y al Ca en Cálcico, se requirió de aguas con alta concentración de sales de sulfato: 50 mM. En el horizonte B, debido a su baja capacidad búffer, ese mismo propósito solo necesitó 0.5 mM de sales en el agua de riego

El aumento de la concentración electrolítica del agua aplicada en la columna de suelo mejora la conductividad hidráulica como producto de la agregación de partículas por la contracción de la doble capa difusa disminuyendo los procesos de dispersión de arcillas. Ambos horizontes al ser tratados con aguas de concentración electrolítica superior o igual a 10 mM presentaron un aumento significativo de la Ks debido posiblemente a procesos de agregación de arcillas mencionados anteriormente, dicho proceso se ve favorecido por la disminución del taponamiento de poros el cual es originado por la expansión y posterior dispersión de las arcillas.

La capacidad de retención de humedad de los horizontes disminuyó al aumentar la concentración electrolítica del agua aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

Abu-Sharar,T.M., Bingham,F.T., Rhoades,J.D., 1987. Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation. Soil Sci. Soc. Am. J. 51, 342-346.

Alperovitch, N., Shainberg, I., 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 Comalfí, Manizales Colombia.

Bohn, H., McNeal, B., O'Connor, G. 1979. Soil Chemistry. New York: Jhon Wiley Sons eds 141-170p.

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.

Bresler, E., McNeal, B.L., and Carrier, D.L. 1982. Saline and sodic soils, principles dinamics-modelling. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Camargo, O. A., Valadares, J. M. A. S.; Geraldi, R.N. 1983 Características químicas e físicas de solos que receberam vinhaça por longo tempo. Campinas, Instituto Agronômico,. 30 p. (Boletim Técnico, 76).

Cavaza, l., Petruno, A., Cirillo, E. 2002. Soil traits and structure stability in artificially sodicated soils. Ital. J. Agron., 6, 1, pp: 15-25.

Curtin, D.; Selles, F.; Steppuhn, H. 1998. Estimating calcium-magnesium selectivity in smectitic soils from organic matter and texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 62, Issue 5 1280-1285.

Curtin, D.,Steppuhn, H., Sekkes, F., 1994. Effects of magnesium on selectivity and structural stability or sodium soils. Soil Sci. Soc. Am. J.58, 730-737.

Dorronsoro, C. 2009. Edafología, Génesis de suelos. Univ. Granada-España. http://edafologia.ugr.es/carbonat/index.htm

Emerson, W.W., and 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. 15:255-262.

Fassbender, H. W. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. 2da Ed. Costa Rica. 151-152p.

FAO, 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO_2. ISBN 95-5-304412-8. 29-32p.

García, A., Rojas, C. 2006 Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. Nota Técnica Tecnicaña.

García, A. 2002. Estudios básicos sobre los suelos afectados por una alta concentración de de Magnesio intercambiable en el valle del rio Cauca. Tomos I, II y III. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

García, A. 1994. Efecto de la concentración de electrolitos en el agua de riego sobre la recuperación de suelos sódicos II. Memorias VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Bucaramanga. Octubre 5-8. Suelos Ecuatoriales Vol. 24: 33-36.

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.

García M., J.E. 1986. Influencia de la naturaleza de la arcilla en las características y practicas de recuperación de suelos salinos y/o alcalinos del Valle del Cauca. Tesis de Magister en Suelos y Aguas, Universidad Nacional de Colombia. Palmira.

Gómez, C.A. 1994. Evaluación de métodos para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos salinos y/o sódicos del Valle geográfico del río Cauca. Tesis de M.Sc. Palmira, Universidad Nacional de Colombia . 220 p.

Gómez, J. J. 1973. Efecto de la relación Ca:Mg invertida sobre el porcentaje de saturación y la conductividad hidráulica. Chapingo, México. 14 p.

Gonzáles, 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.

Greene, R.S.B. and Ford, G.W., 1983. The effect of gypsum on cation exchange and leaching in two red duplex wheat soils. Aust. J. Soil. Res. 21: 187-193.

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.

Hunsaker, V.E., Pratt, P.F., 1971. Calcium-magnesium exchange equilibria in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35, 151-152.

I.C.A. 1990. Manual de laboratorio para el analisis de suelos, plantas y aguas para riego 236p.

IGAC 1990. Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos. Republica de Colombia. Santa fé de Bogota D.E. 499p.

Jayawardane, N.S., and Beattie, J.A. 1979. Effect of soil solution composition on moisture release curves of soil. Australian Journal of soil research. 17: 89-99.

Keren, R. 1991. Specific effect of magnesium on soil erosion and water infiltration. Soil Sci. Soc Am. J. 55:783-787.

Keren,R and Singer, M.J., 1988. Effect of low electrolyte concentration on hydraulic conductivity of sodium/calcium-montnorillonite-sand system. Soil. Sci. Soc. Am. J. 52: 368-373.

Korndörfer, G., Nolla, A Y Lara, W. 2004. Impacto ambiental del uso de la vinaza en la agricultura y su influencia en las características químicas y físicas del suelo Memorias seminario “vinazas, potasio y elementos menores para una agricultura sostenible” Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo, Palmira.

Korndörfer, G.H. & D.L. Anderson. 1997. Use and impact of sugar-alcohol residues vinasse and filter cake on sugarcane production in Brazil. *Sugar y Azucar.* Englewood Cliffs, NJ. n.92, v.3, p.26-35.

Madero, E., Malagón, D., García, A. 2004. Una Mirada al origen y las propiedades de los suelos magnésicos en el Valle del Cauca-Colombia. Rev. Acta Agronómica. (53) 3-4.pp1-22.

Madero, E., Garcia, A. Borrero, J. Y Yamil, L. 1999. Distribución de suelos con alta saturación de magnesio en el Valle del Río Cauca. En Memorias Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. CLACS. Pucón, Chile.

Marulanda, E., y García, A. 1994. Efecto de la concentración electrolítica del agua de riego en la recuperación de suelos sódicos. Memorias VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Bucaramanga. Octubre 5-8. Suelos Ecuatoriales Vol. 29-32.

McNeal,B.L., Layfield, D.A., Norvell, W.A., Rhoades,J.D., 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed-salt solutions. Soil Sci. Am. Proc. 32, 187-190.

Montenegro H., y Malagón D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. IGAC. Subdirección Agrológica. Santa fe de Bogotá, D. E. 813p.

Moutier, M., Shainberg, I., Levy, G.J., 1998. Hydraulic gradient, aging, and water quality effects on hydraulic conductivity of a vertisol. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 62, 1488-1496.

Narro, F. E. 1994. Física de Suelos con enfoque agrícola. Editorial Trillas. México. 195p.

Nunes, M. R., Velloso, A. C. X.; Leal, J. R. 1982 Efeito da vinhaça na lixiviação de nutrientes do solo III. Potássio e magnésio. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, 17: 371-374.

Pla, I. 1979. Calidad y uso de agua para riego. Revista Suelos Ecuatoriales. Colombia. 5 (10), 26-50.

Quintero, R. 2004. Perspectivas acerca del uso y manejo de vinazas aplicadas al suelo Memorias seminario “vinazas, potasio y elementos menores para una agricultura sostenible” Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo, Palmira

Quintero, R. 2003 Resultados preliminares y proyecciones acerca del uso de la vinaza en Colombia. En: VI Congreso Colombiano de Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Cali, Colombia, 2003. Memorias, volumen 1. Cali, Tecnicaña, 2003. pp.113-121.

Quirk, J.P., Schofield, R.K. 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. J.Soil Sci. 6:163-178.

Quirk, J.P. 1994 Interparticle forces: A basic for the interpretation of soil physical behavior. Adv Agron. 53: 121-182

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. 30:535-546.

Rao, S. 1983 El valor nutritivo de la vinaza y su efecto en el pH del suelo. In seminario Interamericanos de la caña de azúcar. Fertilidad y manejo de suelos. Miami. p. 540 – 549.

Rengasamy, P., Olsson, K.A., 1991. Sodicity and soil structure. Aust. J. Soil Res. 29, 935-952.

Rodriguez, J.A. 2006. Efecto de varias enmiendas sobre las condiciones físicas, químicas y biológicas de un suelo magnésico cultivado con vid en el valle del rio cauca. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 93 p. Tesis de Maestría.

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. 30:719-726.

Shainberg, I., N. Alperovitch., and Keren, R. 1988. Effect of magnesium on the hydraulic conductivity of Na-smectite-sand mixtures. Clays Minner. 36: 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 whith distiled water. Hilgargia, University of California. 52(2): 29-30.

Shainberg, i. Rhoades, j. D. and Prather, R.J. 1981 Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 45:273-277.

Subiros, J. 1992 Efecto de la aplicación de vinazas en la producción de caña de azúcar y en las características químicas de un inceptisol de guanacaste, COSTA RICA Agronomía Costarricense 16(1): 55-60.

Sumner, M.E. 1992 The electrical doublé layer and clay dispersión. In: Soil Crusting. Advances in soil science. Lewis Publisher. 1-32 p.

Torrente, A. 2003. Características físicas e hidrodinámicas en suelos con alta saturación de magnesio en Valle del Río Cauca, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Postgrados Sede Palmira. Tesis Doctoral.

Torrente, A., García, A. 2002. Relaciones hidrodinámicas de un vertisol magnésico en el valle del río cauca. Revista de suelos ecuatoriales. Vol. 32 p. 127-130.

Yousaf, M., O. M. Ali, and J. D. Rhoades. 1987. Dispersion of clay from some salt-affected, arid land soil aggregates. Soil. Sci. Soc. Am. J. 51: 920-924.

Viani, B.E., Low, P.F., Roth, C.B., 1983. Direct measurement of the relation between interlayer force and interlayer distance in the swelling of montmorillonite. J. Colloid Interfase Sci. 96, 229-243.

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. 62.

Zhang, X. C.; Norton, L. D. 2002. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. Journal of Hydrology 260: 194-205.