

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

**ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO EN CINCO
ÓRDENES DE SUELO EN PALMIRA, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA**

POR:

BRAYAN EDUARDO MONTERO GARCÍA

TESIS



CATACAMAS, OLANCHO

HONDURAS, C.A.

JUNIO, 2016

**ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNIC EN CINCO
ÓRDENES DE SUELO EN PALMIRA, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA**

POR:

BRAYAN EDUARDO MONTERO GARCÍA

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

**JUAN CARLOS MENJIVAR FLORES, Ph.D
Asesor Principal Adjunto UNAL Palmira, Colombia**

TESIS

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

CATACAMAS, OLANCHO

HONDURAS, C.A.

JUNIO, 2014

ACTA DE SUSTENTACIÓN

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico principalmente a **DIOS**, mi fiel amigo y sustento, quien me ha enseñado su exagerado amor y su inmensa fidelidad para mi vida a lo largo de este camino que día a día se convierte en un desafío.

A mis sorprendentes padres: **Feliciano de Jesús García y Jorge Alexis Montero Sánchez**, por incondicional apoyo y amor que ha servido de inspiración para mi vida demostrándome que cuanto con ellos en todo momento.

A mis hermanos **Maverick Jadira Montero García y Edgar Alexis Montero García**, por estar a mi lado motivándome a seguir adelante y a luchar con empeño por todo su amor y comprensión y confianza que han depositado en mí en estos cuatro largos años

A mi novia **María Donai Serrano Hernández**, por su amor sincero y por ser esa maravillosa persona que ha estado a mi lado recordándome a cada momento que debe esforzarme más cada día, por esa forma única de cuidar de mí todo este tiempo.

A mi madre abuela **Feliciano de Jesús Aceituno** por ser tan bella conmigo cubriéndome día a día con sus oraciones matutinas y por sus consejos que con amor recibo.

Al ministerio **AMIGOS DE JESÚS**, por ser la voz de Dios para mi vida en este lugar cambiando mis conceptos de Joven cristiano enseñándome lo maravilloso que es servir a Dios y a la vez haciendo que mi estadía en la **UNA** fuera toda una aventura.

AGRADECIMIENTO

A **DIOS** mi Señor, por darme la inteligencia, y por ser todo mi sustento en mi vida enseñándome a depender de él y avanzar aun cuando no hay camino.

A mi Alma Mater la **UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA**, donde he sido formado bajo principios de estudio, trabajo y disciplina que donde sea que me lleve la vida están presentes en mí, tales principios.

Al consejero principal **MSc. José Trinidad Reyes Sandoval**, por su grandioso apoyo profesional y excelente disposición que acompañados con sus consejos fueron muy valiosos para la realización de este trabajo de investigación.

Al **Ph D. Juan Carlos Menjivar Flores**, por haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo en la UNAL, Palmira Colombia, por la disposición y apoyo logístico y académico ofrecido durante mi estadía en ese maravilloso país.

A **M Sc. Ramón León Canaca**, por aportar sus conocimientos, consejos y disponibilidad para poder realizar mi trabajo.

A mi **pastora Zenaida Zelaya**, por todo su apoyo en todas las facetas de mi vida y por todos esos consejos, oraciones y amor que ha mostrado para conmigo.

A mis maravillosos y únicos padres: **Feliciano de Jesús García y Jorge Alexis Montero Sánchez**, por gran ejemplo y amor para mi vida y por ser mi inspiración.

A mis hermanos **Maverick Jadira Montero García** y **Edgar Alexis Montero García**, quienes me han regalado un amor y apoyo único para poder ser más fuerte en la vida.

A mis **hermanos y amigos del Ministerio Amigos de Jesús**: Cindy Gómez, Fernando Rodríguez, Donai Serrano, Fabricio Márquez, José Rodríguez, Sergio Darío, Willy Orellana, Vanesa Cantarero, Samuel Gámez, Dayana Martínez, Johnny Figuera y Mario Samuel

A mis **compañeros de cuarto**, Elder meza (el Ing.), Darío Reyes (El Flaco), Bairon Posadas (Hompy), Jerry Vega (Calamardo), Denis Girón (tecnologuito), Naldo Norales (el morenito), Adonis Mejía (el primo) y Alex Meza (mesita), por todos los momentos vivido en este camino hacia la ingeniería agronómica.

A mis **compañeros de clases**, Nelson Omar Murillo (pelo Liso), Víctor Manuel (Jersy), Cesar Eduardo (Ternero), Milton Morales (Choco-Max), Mata Gómez, Daniel Mendoza (Chacal), Alex Oseguera (el Paisino), Gabriela Moran (Gaby), por todos los momentos vividos

A las **personas de lavandería y el comedor estudiantil** por su servicio prestado.

CONTENIDO

ACTA DE SUSTENTACIÓN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general:	3
2.2 Objetivos específicos:.....	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Generalidades de los suelos.....	4
3.2 Los elementos químicos en el suelo.	6
3.2.1 Fase sólida del suelo	6
3.2.2. Fase líquida del suelo	8
3.3 Interacción catiónica.....	9
3.4 Los coloides del suelo.....	11
3.5 La carga permanente.....	12
3.6 La carga variable	13

3.7 Generalidades de la CIC	15
3.8 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	16
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.1 Materiales y equipo	17
4.1.1 Localización del área experimental	17
4.1.2 Experimento.....	17
4.1.3 Factor bajo estudio.....	18
4.1.4 Unidad experimental.....	18
4.1.5 Tratamientos	18
4.1.6 Diseño experimental	19
4.1.7 Modelo estadístico	19
4.2 Manejo del experimento	20
4.2.1 Recolección de muestras de suelo	20
4.3 Variables evaluadas	21
4.3.1 pH del suelo	21
4.3.2 Porcentaje de arcilla presente en el suelo (%)	21
4.3.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	22
4.3.2 Contenido de materia orgánica	22
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5.1 Textura del suelo	24
5.2 pH del suelo	27
5.3 Materia orgánica presente en el suelo.....	29
5.4 Capacidad de intercambio catiónico de cinco órdenes de suelo.....	31
5.4.1 Calcio intercambiable	31
5.4.2 Magnesio de cambio.....	34
5.4.3 Potasio de cambio.....	36
5.4.4 Sodio de cambio	38
4.4.5 Estimación de la CIC	39
VI. CONCLUSIONES	23

VII. RECOMENDACIONES	23
VIII. BIBLIOGRAFÍA	34
Anexos.....	37

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos en estudio	18
Cuadro 2. Análisis de suelo realizada en cinco ordenes	24
Cuadro 3. Capacidad de intercambio catiónico y cantidad de bases de cambio	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zona de recolección de muestras para la estimación de la CIC	20
Figura 2. Cantidad de las partículas de limo, arcilla y arenaorman la textura del suelo	26
Figura 3. En un suelo con pH ácido, los iones H^+ reemplazan a los de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+	27
Figura 4. Nivel de pH de 5 órdenes de suelos	27
Figura 5 Cantidad de materia orgánica en 5 órdenes de suelo.	29
Figura 6. Contenido de Calcio cambiabile en 5 órdenes de suelo.....	34
Figura 7. Contenido de Magnesio cambiabile 5 órdenes de suelo	36
Figura 8. Contenido de Potasio cambiabile 5 órdenes de suelo	38
Figura 9. Contenido de sodio de cambio por tratamiento	40
Figura 10. Visión esquemática del intercambio catiónico en un suelo	41
Figura 11. Dinámica de cambio de las arcillas y materia orgánica.....	41
Figura 12. Capacidad de intercambio catiónico de cinco ordenes de suelo.....	43

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Nivel de acidez determinados por pH.....	38
Anexo 2. Interpretación de bases de cambio y CIC	38
Anexo 3. Valores porcentuales de bases de cambio.....	38
Anexo 4. Cuadro de Análisis de la Varianza de pH.....	39
Anexo 5. Análisis de la varianza de materia orgánica	39
Anexo 6. Análisis de la varianza Calcio.....	40
Anexo 7. Análisis de la varianza de Magnesio de cambio.....	40
Anexo 8. Análisis de la varianza de Potasio.	41
Anexo 9. Análisis de la varianza Sodio.....	41
Anexo 10. Análisis de la varianza CIC.	42

Montero García, B.E. 2016. estimación de la capacidad de intercambio catiónico en cinco órdenes de suelo en Palmira, valle del cauca, Colombia. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional de Agricultura. 69 p.

RESUMEN

El experimento se realizó en el laboratorio de microbiología del suelo de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira en el departamento del Valle del Cauca. Se evaluó la capacidad de intercambio de cationes (CIC) de cinco ordenes de suelo por medio de embudos de percolación (columnas de intercambio). Se depositaron 5 g de suelo más 50 ml de una solución de Acetato de amonio $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1 N pH 7 durante ocho horas, produciendo un lixiviado que fue analizado haciendo uso del espectrofotómetro de emisión y absorción atómica. En este lixiviado se midió Na^+ y K^+ por fotometría de llama (emisión atómica), Ca^{2+} y Mg^{2+} por absorción atómica. Posteriormente se añadió acetato de sodio CH_3COONa 1N pH 8,2 a las mismas muestras de suelo y se dejó reposar por ocho horas consecutivas, el lixiviado producido fue desechado. Se repitió el mismo proceso con acetato de amonio donde se produjo un nuevo lixiviado en el que se midió el sodio absorbido dando como resultado la capacidad de intercambio catiónico total de cada suelo. Para completar la evaluación de la CIC de cinco suelos bajo estudio se evaluó en ellos el pH, la presencia de arcillas y la presencia de materia orgánica. Se utilizó un diseño completamente al azar con prueba de Tukey. Se observó que el orden molisol presentó la mayor CIC entre los demás suelos debido al alto contenido de materia orgánica y arcilla; mientras que la orden Oxisol posee una menor CIC, al mismo tiempo que menor cantidad de arcilla. Se pudo observar que la arcilla tiene una influencia directa en la capacidad de intercambio catiónico de los suelos.

Palabras claves: Acetato de amonio, acetato de sodio, arcillas, CIC, lixiviado materia orgánica,

I. INTRODUCCIÓN

Los suelos del Valle del Cauca se encuentran clasificados dentro de los más productivos de Colombia, sin embargo, dichos suelos se encuentran en zonas cuyas condiciones climáticas son tales que si no se realiza un buen manejo de la calidad del agua riego, las prácticas de laboreo (arado, cosecha con maquina) y de los fertilizantes, puede llegar a existir un riesgo de pérdida de nutrientes; riesgo que acarrea una gran preocupación por el impacto que pueda llegar a generar en el departamento, específicamente en el sector productor de caña, el cual es quién en mayor proporción da uso a los suelos para su actividad agroindustrial.

Dentro de las propiedades que posee el suelo la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es probablemente la más importante ya que permite conocer la cantidad de los cationes que pueden ser retenidos y liberados de la superficie del coloide del suelo hacia el medio circundante, de donde la planta aprovecha dichos elementos para su nutrición.

Se han realizado algunas estimaciones de la CIC que se presenta en los suelos del Valle del Cauca Frye (1959) y Madero (2000), en el cual realizando cerca de 2000 muestreos a lo largo de la parte plana del departamento en donde evaluaron indicadores como, pH, iones intercambiables entre otros (en algunos puntos iones solubles); se estableció que algunas zonas como la del RUT (Roldanillo, Toro, La Unión) y los tramos comprendidos entre El Cerrito y Palmira tienen problemas de capacidad de intercambio catiónico (CIC), ya que resultado significativamente baja, lamentablemente dicho estudio no tuvo ningún tipo de divulgación.

En vista de esta problemática y tomando en cuenta que los valores de la CIC de los suelos, difieren dependiendo de los métodos y procedimientos usados en el proceso de análisis, se realizó este trabajo de investigación en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional Sede Palmira Colombia, con el propósito de contribuir a la determinación de la CIC especialmente en cinco ordenes de suelo a través del uso de columnas de intercambio y saturación con las bases acetato de sodio y acetato de amonio.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Determinar mediante el método de columnas la capacidad de intercambio catiónico de cinco órdenes de suelo.

2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar las bases de cambio (sodio, magnesio, calcio y potasio) presentes en los suelos bajo estudio.
- Identificar las propiedades físico-químicas que influyen en la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Generalidades de los suelos

Los suelos se han formado a expensas de rocas y de depósitos de materiales transportados, los cuales han estado expuestos a diferentes factores (clima, microorganismos, temperatura, vegetación, presión, entre otros) que la diferencia del sustrato geológico del cual provienen. Para el observador desprevenido, el suelo es fundamentalmente una formación natural capaz de sostener la vida vegetal, entendiéndose como tal desde la película microscópica y superficial de una roca, hasta los limos aluviales profundos donde pueden desarrollarse bosques frondosos (Arellano 2001).

Esto no es así para el especialista (por ejemplo, un agrónomo), quien está urgido de aplicar tecnologías refinadas, indispensables para conservar y mantener altos incrementos en la producción de los suelos

Los científicos distinguen el suelo de otros materiales geológicos por sus cuatro componentes principales: la existencia de partículas minerales, material orgánico, agua y aire. De esta forma, un suelo maduro se forma después de cientos de años en que los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos, logran un contenido de materia orgánica significativo, mezclado con las finas partículas provenientes de la roca madre (Zaror 2000).

Los distintos tipos de suelo varían en su color, grosor, en el número de capas, en la cantidad de arcilla, sales y material orgánico que contienen; factores que afectan la movilidad de los contaminantes a través del suelo. El suelo está formado por rocas que a lo largo de grandes periodos se han ido meteorizando (Arellano 2001).

Existen tres tipos de roca que conforman la corteza de la tierra:

- i) roca ígnea o magmática que es material de lava solidificado. La solidificación del magma y su consiguiente cristalización puede tener lugar en el interior de la corteza, tanto en zonas profundas como superficiales, o sobre la superficie exterior de ésta. Si la cristalización tiene lugar en una zona profunda de la corteza, las rocas se denominan intrusivas. Si la solidificación magmática es en la superficie terrestre, las rocas se denominan extrusivas
- ii) la roca sedimentaria se forma por acumulación de sedimentos que, sometidos a procesos físicos y químicos, resultan en un material de cierta consistencia pueden formarse a las orillas y desembocaduras de ríos, en el fondo de barrancos, valles, lagos y mares, y se encuentran dispuestas formando capas o estratos.
- iii) la roca metamórfica que es una roca sedimentaria o ígnea modificada por la temperatura, la presión y fluidos químicos activos. Todas estas rocas conforman, en su conjunto, lo que comúnmente llamamos subsuelo.

El conjunto de propiedades físicas y químicas progresivas que adquieren los suelos bajo la acción combinada de los factores del medio, hacen del suelo un medio natural, complejo y dinámico, en constante evolución, a pesar del énfasis que siempre han tenido las características químicas del suelo, siendo erróneamente concebidas como las directamente relacionadas con los niveles de producción agrícola, las propiedades físicas son las que ejercen una mayor influencia en este aspecto. Algunas propiedades físicas del suelo son: color, textura, estructura, consistencia, densidad, porosidad y capacidad de retención de agua; y algunas propiedades químicas son: pH y capacidad de intercambio catiónico y aniónico (IDEAM 2001)

3.2 Los elementos químicos en el suelo.

Los elementos químicos del suelo pueden estar contenidos en:

3.2.1 Fase sólida del suelo

La fase sólida está formada principalmente por materiales inorgánicos y materia orgánica en diferente etapa de descomposición (Zaror 2000).

La materia orgánica es la fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo. Esta fracción se determina en general en suelos que pasan por un tamiz con malla de 2.0 mm (Ramírez 1971).

El humus es la fracción más o menos estable de la materia orgánica del suelo, la que se obtiene después que se ha descompuesto la mayor parte de las sustancias vegetales o animales agregadas al suelo. Generalmente es de color negro. El humus está compuesto por los restos posmortem de vegetales y animales que, depositados en el suelo, son sometidos constantemente a procesos de descomposición, transformación y síntesis. El edafón lo forman los organismos vivientes del suelo, es decir, la flora y fauna del suelo (Bernier 2007)

La composición bioquímica de los restos vegetales y animales varía dentro de un amplio rango, los tejidos verdes son más ricos en carbohidratos y proteínas, los tejidos leñosos contienen compuestos fenólicos (ligninas) y celulosas. Las bacterias tienen alto contenido de proteínas, los líquenes contienen muchos carbohidratos. Entre los componentes orgánicos de los restos vegetales y animales están los carbohidratos, proteínas, polipéptidos, ácidos nucleicos, grasas, ceras, resinas, ligninas, etc.

El proceso de humificación consiste en la degradación o descomposición de la materia orgánica como proteínas, carbohidratos, etc. que por procesos de síntesis y polimerización

producen nuevos agregados químicos que se llaman ácidos húmicos. Tienen estructura aromática compleja y variable, son compuestos de masa molecular entre 10 000 y 50 000 g/mol (Zaror 2002).

Los ácidos húmicos se clasifican en tres grupos: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas de acuerdo a su solubilidad en diferentes solventes como agua, bromuro de acetilo, alcohol etílico y el hidróxido de sodio en solución. Los ácidos fúlvicos representan la fracción de humus extraíble por álcali, que no precipita por ácidos y que tiene color amarillento rojo. Generalmente son compuestos fenólicos de peso molecular bajo (BIOTEC 2002).

Los ácidos húmicos se extraen con hidróxido de sodio y que puede precipitar por ácidos como el ácido clorhídrico. Generalmente son polímeros de alto peso molecular que forman coloides esferoidales, su capacidad de intercambio catiónico se debe a la presencia de la función ácido orgánico (-COOH) y de la función hidroxilo. La fracción de los ácidos húmicos soluble en etanol se denomina ácido himatomelánico, que es de color marrón rojizo.

Los ácidos húmicos pardos son más difíciles de flocular y son más pobres en nitrógeno que los ácidos húmicos grises. Las huminas representan la fracción que sólo es soluble en solución de hidróxido de sodio caliente (BIOTEC 2002).

Los restos vegetales y animales son polímeros de compuestos orgánicos que durante el proceso de transformación son degradados hasta sus constituyentes básicos y como se forma nitrógeno, fósforo y azufre le llaman proceso de mineralización. Por el proceso de humificación y mediante síntesis microbiológica se producen nuevos compuestos químicos de masa molecular grande y de color oscuro, que constituyen la fracción edáfica del suelo.

3.2.2. Fase líquida del suelo

Siendo estrictos, los suelos son sistemas sin equilibrio, ya que continuamente están ocurriendo reacciones físicas, químicas o biológicas que les están alterando sus propiedades. No obstante, se pueden alcanzar equilibrios parciales en algunos suelos en los que los sólidos del suelo no cambian. Por ejemplo, el intercambio de cationes de Na^+ y de Ca^{2+} (Buckman 1997).

Uno de los aspectos importantes del conocimiento de un suelo es el estudio de sus propiedades químicas ya que la fase líquida del suelo está formada por la solución del suelo que proporciona los nutrientes a las plantas y es el medio en el que se llevan a cabo la mayoría de las reacciones químicas del suelo, las cuales se tratan de explicar con base en los principios de la química.

Los minerales son óxidos cuyas cargas son contrarrestadas por los iones de silicio, aluminio, fierro y pequeñas cantidades de otros cationes (Bohn 1995).

Gran parte del comportamiento químico del suelo se puede explicar considerando la competencia entre las especies químicas del oxígeno, O_2^- , OH^- y H_2O para captar cationes y aniones en la solución de suelo y en los sólidos adyacentes, ya que el agua es un óxido cuya carga es contrarrestada por los iones de hidrógeno (Bohn 1993).

La cantidad de átomos, iones y moléculas que participan en una reacción química es tan grande que no se pueden medir directamente, sin embargo, es importante conocerlo porque determina la magnitud de una reacción química. Como el medio químico de un ion en una solución acuosa es muy semejante en algunos aspectos al medio que rodea al mismo ion en una mineral resulta importante el estudio de las soluciones acuosas.

El que las moléculas de agua interactúan fuertemente entre sí supone de manifiesto en la temperatura de ebullición tan alta y en el gran valor del calor específico del agua. Por ejemplo, el sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico) H_2S es una molécula químicamente muy similar a la del óxido de hidrógeno, H_2O , pero tiene una temperatura de ebullición muy baja, 61°C , debido a que la interacción entre sus moléculas es mucho menor que la de las moléculas de H_2O (Castro 2005).

La razón principal para que existan las interacciones tan fuertes entre las moléculas de H_2O son sus puentes de hidrógeno y que los iones hidrógeno forman un ángulo de 105° , lo que genera un dipolo con extremos positivos en los hidrógenos y negativos del lado del oxígeno.

La atracción electrostática del extremo positivo de una molécula de H_2O con el extremo negativo de otra molécula de H_2O forma una estructura interna que se pone de manifiesto en el hielo (agua sólida) y se observa débilmente en el agua líquida. Esto hace que se formen en el agua líquida pequeños grupos de moléculas de agua que tienen una estructura parecida a la del hielo, es decir, que a nivel molecular el agua líquida es como una suspensión de hielo en agua (Castro 2005).

En una solución acuosa, las moléculas de agua y los solutos en el agua interactúan todas entre sí (las moléculas de agua con las de agua y con las de los solutos y viceversa). Las moléculas de los solventes y de los solutos iónicos y no iónicos nunca están libres de la influencia de las otras moléculas o iones de su alrededor. Sin tales interacciones el estudio de la química de soluciones sería sencillo ya que las soluciones líquidas se comportarían como los gases ideales, sin considerar interacciones entre las partículas que los constituyen (Jaramillo 2002)

3.3 Interacción catiónica

Generalmente se habla sólo de las fases sólida, líquida y gaseosa pero no se considera a la fase coloidal que forma a las arcillas. Una parte del agua del suelo y gran parte de los iones

de la solución del suelo está determinada por las cargas y los enlaces químicos que no se llevan a cabo entre los minerales arcillosos y la materia orgánica (Estrada 1998).

La carga predominantemente negativa de los coloides del suelo retiene cationes en la película de agua sobre la superficie del coloide, lo que reduce la pérdida de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . Por lixiviación y al mismo tiempo mantiene estos cationes disponibles para que sean captados por los vegetales. Principalmente, los cationes de los metales de transición y el aluminio precipitan como aluminosilicatos y casi ni están presentes en la fase acuosa. Los cationes de los metales alcalinos y alcalinotérreos tienen menor oportunidad de precipitar debido a su tamaño y a su carga. Por lo que, permanecen en la fase acuosa y neutralizan la carga superficial.

La cantidad disponible para los vegetales de cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , los considerados macronutrientes esenciales se encuentran en la parte de la solución de suelo cercana a la superficie de los coloides. Estos cationes se conocen como intercambiables porque se pueden intercambiar por otros mediante la adición de fertilizantes, de cal o por irrigación (Ramírez 1980).

Los cationes liberados mediante el proceso de intemperismo y por descomposición de la materia orgánica varían grandemente en cuanto a la carga del ion, tamaño, polaridad y reaccionan de manera diferente a los iones y superficies encontrados en el suelo. Algunos tienden a precipitar de nuevo como minerales formados por el suelo (fase sólida); otros tienden a permanecer en solución, aunque asociados con la superficie de la fase sólida (iones intercambiables); otros son competidores deficientes por la carga superficial y, por lo tanto, permanecen de manera predominante en la solución de suelo (iones solubles) (Chávez 1986).

Las soluciones de sales eliminan algunos aniones de los suelos y debido a que la mayoría de los coloides del suelo están cargados negativamente, la reacción principal la constituye el intercambio de los cationes del suelo por los de la solución extractora. Generalmente, la distribución de los principales cationes intercambiables en los suelos agrícolas productivos es: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ = \text{Na}^+$. Lo que les ocurre a los iones después del intemperismo

mineral y la descomposición de la materia orgánica depende tanto de las propiedades de los iones como de las del suelo o de los materiales producto del intemperismo y la descomposición (Iriarte 1993).

La composición de los cationes intercambiables en los suelos tiende a ser mucho más uniforme que la composición de la roca madre de la que se han derivado los cationes. No obstante, los cambios a gran escala en los factores de formación del suelo modifican de manera definitiva la distribución de los cationes intercambiables.

Las reacciones de intercambio catiónico son rápidas y su velocidad depende de la difusión del ion hacia la superficie del coloide o desde dicha superficie. A la relación de la dependencia entre el intercambio catiónico y la valencia del catión se le conoce como efecto de dilución de valencia. Para fines prácticos, la suma de los cationes intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} y Al^{3+} Equivale generalmente a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo.

La composición del catión intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico se expresan en moles de la carga del ion/kg (anteriormente, meq/100g o meq/g). Como las cantidades intercambiadas de cationes son equivalentes químicamente el intercambio catiónico es reversible y este quiométrico. Por otra parte, la suma de todos los cationes intercambiables presentes a un pH específico varía ligeramente con el tipo de catión (Adams 1997).

3.4 Los coloides del suelo

Una partícula coloidal es aquella que posee un tamaño menor 0.001mm de diámetro (1000nm), dimensiones responsables de la alta superficie que las características; poseen, además, carga eléctrica que les confiere una alta reactividad química.

La superficie específica de un cuerpo es el área total que expone, es decir, es el área externa que posee ese cuerpo por unidad de peso del mismo; así, la superficie de un cubo de 1 g de peso, será la suma de las áreas de las seis caras externas que posee ese cubo $6L^2$ ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$), donde L es el lado del cubo.

En el suelo los coloides están presentes por las partículas de tamaño de arcilla y por los compuestos húmicos. Son los responsables de la actividad química que se desarrolla en aquel, así como las buenas partes de su comportamiento físico.

Los coloides del suelo pueden poseer dos tipos de carga: permanente o variable, mediante la acción de diferentes mecanismos y según, los componentes del suelo que pueden aportar carga superficial son los minerales silicatados laminares, los óxidos libres y el humus. Los silicatos aportan principalmente carga permanente y negativa, excepto cuando son del tipo de arcilla 1:1, los óxidos de Fe, Al y Mn aportan carga variable, tanto negativa como positiva y el humus aporta carga variable, principalmente negativa.

3.5 La carga permanente

La carga permanente es aquella carga que está presente siempre en el coloide, sin importar las condiciones del medio en el cual se encuentra, debido a que dicha carga la adquiere durante su proceso de formación.

El mecanismo que interviene en la producción de este tipo de carga es el de la sustitución isomórfica, el cual consiste en reemplazar el catión central de las unidades estructurales básicas de los filosilicatos (tetraedro y octaedro) por otros cationes de tamaño similar. La carga se genera cuando la sustitución se hace por un ion que tiene menor carga que el que es reemplazado.

Según (Bohn, 1993) la sustitución isomórfica se presenta entre iones cuya diferencia de tamaño entre los respectivos radios iónicos está entre 10 y 15 %. Según Yu (1997) las

sustituciones más frecuentes son las de Si^{4+} por Al^{3+} en tetraedro y las de Al^{3+} en tetraedros y las de Al^{3+} por Mg^{2+} , Fe^{2+} o por Fe^{3+} , en los octaedros. En algunas sustituciones el catión sustituido tiene mayor carga que el catión que lo reemplazo, generándose un remanente de carga en la unidad estructural que fue sometida al proceso de sustitución como se aclaró antes.

La carga permanente es el tipo de carga que predomina en los silicatos laminares 2:1 y 2:1:1, estando prácticamente ausente en los 1:1 y en los demás coloides del suelo. El tipo de minerales que produce carga permanente es dominante en los suelos. El tipo de minerales que producen carga permanente. Este tipo de carga es característico de suelos de los órdenes Vertisol, Mollisol y de buena parte de los Alfisoles.

3.6 La carga variable

Este tipo de carga corresponde a aquella que se desarrolla en el coloide cuando cambia las condiciones ambientales del medio en el cual se encuentran. La propiedad que más afecta los coloides del suelo, con respecto a su carga, es el pH por lo cual a esta carga variable también se la conoce como carga dependiente del pH, pues son los cambios en él los que la generan en mayor proporción. En este tipo de carga hay también la posibilidad de generar cargas positivas o negativas, dependiendo del valor de pH en el cual las partículas sólidas del suelo de carga superficial variable, no tiene carga neta; el valor del pH que produce dicha condición de carga se llama punto de carga cero (PCC) (Adams 1997).

La variación de la carga superficial en coloides de carga superficial variable se estudia mediante titulaciones potenciométricas como una función del pH y de la concentración de electrolitos. En los sistemas donde no hay coloides con carga permanente, no hay efecto de la concentración de los electrolitos y la intersección de las curvas de pH carga se produce sobre el eje de carga cero, con lo que se obtiene el pcc, cuando en el sistema hay presencia de coloides con carga permanente, positiva o negativa, el punto de intersección se desplaza

por encima o por debajo de dicho eje en estos casos proponen llamar al PCES como PCC “aparente” según Zhang y Zhao (1997).

entre mayor sea la diferencia entre los valores de PCNC y PCC, mayor cantidad de carga superficial permanente hay en el sistema si el pH del medio se encuentra por encima del PCC, los coloides generaran cargas negativas y si el pH es menor que el PCC, entonces se producirán cargas positivas en los coloides.

La carga variable es la que predomina en los minerales silicatados de tipo 1:1, en los sesquióxidos de Fe y de Al, en los aluminosilicatos no cristalinos y en los coloides orgánicos. Por lo anterior, es dominante, en general, en los órdenes Oxisol, Ultisol y Andisol; en Colombia también es frecuente en los Inceptisoles. Según Zhang y Zhao (1997), es la carga variable puede producirse mediante los siguientes mecanismos:

En el humus, los grupos carboxilo e hidroxilo representan alrededor de 50 % y 30% de los grupos funcionales totales, respetivamente y la carga que produce el humus es predominante variable y negativa, debida a la disociación de dichos grupos. Cuando el suelo presenta pH alto se puede presentar un aporte adicional de carga negativa por disociación de grupo amino.

La superficie de óxidos y de óxidos hidratados de Fe, Al y Si, poseen grupos hidroxilo unidos directamente al Fe, al Al o al Si, formando los grupos Ferrol (Fe-OH), aluminol (Al-OH) y silanol (Si-OH), respectivamente, o pueden estar unidos a moléculas de agua mediante enlaces de hidrogeno. La carga superficial en dichos óxidos e hidroxilos se generan por disociación y perdida del H^+ de los grupos hidróxidos: carga negativa, o por combinación de los grupos hidroxilos con iones H^+ la solución del suelo: con carga positiva.

De todos los coloides del suelo que generan carga predominante variable, los coloides orgánicos son los que producen una mayor cantidad de carga, la cual es netamente negativa; con los respecto a los coloides minerales, los aluminosilicatos no cristalinos son los coloides

de mayor producción de carga variable, la cual es también netamente negativa; los sesquióxidos de Fe y de Al son los que menos carga variable negativa desarrollan, sobre todo si son cristalinos, pero son los que más carga positiva aportan al suelo, aunque con amplia variación en la cantidad debidas a la composición y al grado de cristalinidad que tengan.

3.7 Generalidades de la CIC

Uno de los componentes esenciales del suelo, es la fase sólida constituida por las fracciones inorgánica y orgánica que forman el coloide. La fracción coloidal es la parte más activa del suelo y en ella ocurre una serie de cambios llevados por la interacción con el medio líquido, gaseoso y la fase biológica del suelo. Uno de los efectos de dicho dinamismo, es la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) propiedad de mayor importancia práctica, ya que la capacidad de adsorción retención, almacenamiento y liberación de nutrientes para las plantas, dependen de la magnitud y características de la CIC del suelo.

La capacidad de adsorción de cationes por los suelos está dada principalmente por los minerales de arcillosos y la materia orgánica en estado húmico Drake y Motto & Quevedo (1998). Asimismo, la CIC es afectada por la presencia de óxidos e hidróxidos de Si, Fe y Al. La determinación de la CIC consiste en medir la cantidad total de cargas negativas que posee el complejo arcillo húmico por unidad de peso del suelo expresado en meq/100 g de suelo o cmol (+)/kg de suelo, dependiendo el valor de la CIC según la metodología empleada y a la vez la naturaleza del catión saturante, concentración de la solución saturante y el pH del equilibrio entre la solución saturante y el suelo.

En la superficie del coloide generalmente de carga negativa, los cationes cambiables se hallan adsorbidos con diferentes grados de energía y cuya fuerza de adsorción está en función de; a) tamaño del catión; b) concentración; c) valencia; d) grado de hidratación y, e) la capacidad o la afinidad para ser retenido en un determinado mineral arcilloso (Estrada 1971).

Según (Ramírez, 1971) la fuerza de adsorción de los cationes por los suelos puede variar en base a las condiciones climáticas de donde proceden los suelos, por ello en regiones húmedas: $Al^{+++} > H^+ > Ca^{++} > Mg^{++} > K^+ > Na^+$, en regiones áridas (suelos bien drenados): $Ca^{++} > Mg^{++} > Na^+ > K^+ > H^+$ y para regiones áridas (suelos salinos y sódicos): $Na^+ > Ca^{++} > Mg^{++} > K^+$ y para la combinación de diferentes valencias, presentan la siguiente fuerza de adsorción $Li^+ \approx Na^+ < K^+ \approx NH_4^+ < Rb^+ < Cs^+ \approx Mg^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} \approx Ba^{2+} < La^{3+} \approx H^+ (Al^{3+}) < Th^{4+}$. (Fuentes, Bohn, et al 1993).

La afinidad relativa de la superficie arcillo-húmico por diferentes cationes, dependen de dos propiedades: (i) del grupo funcional superficial y (ii) de los cationes adsorbidos. Según Xu y Harsh, (1990). La preferencia del cambiador por un catión determinado, varía según la superficie externa e interna, expansibilidad de las arcillas, dimensión específica del espacio interlamina y fijación de NH_4 y K^+ , distribución geométrica de las cargas (densidad) y presencia de los radicales externos en la materia orgánica (Quevedo 1987).

3.8 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La CIC como medida de la capacidad que tiene el suelo para adsorber cationes es equivalente a la carga negativa del suelo (Jaramillo 2002) que poseen las fracciones de arcilla, limo y la materia orgánica coloidal (Quevedo 1981 y Otero *et al* 1998).

La reacción de intercambio, entre las fases sólidas y solución del suelo implica un proceso reversible, equivalente y es expresado en meq/100 g de suelo o cmol (+) kg⁻¹ de suelo. Los suelos por su naturaleza anfotérica adsorben tanto cationes y aniones según las cargas generadas en el intercambio iónico de:

1. sustitución iónica isomórfica (carga negativa permanente), 2. ionización de los oxidrilos (OH) del Si de los planos rotos de los tetraedros o del Al de los octaedros, 3. de los ácidos minerales y sesquióxidos del suelo, y 4. de la materia orgánica. En estos tres últimos casos,

la generación de cargas negativas y/o positivas es generalmente dependiente del pH (Estrada 1989; Bear 1963 y Fassbender 1978).

Los factores que influyen sobre la determinación de la CIC de los suelos son el pH de la solución extractora, contenido de la materia orgánica, cantidad y calidad de arcilla de los suelos. Asimismo, afectan los factores genéticos del suelo inherentes de la estructura de la arcilla, procesos de edafización y a nivel de laboratorio se debe considerar a los factores analíticos en cada uno de los pasos que se sigue durante el proceso de la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (Rhoades 1982).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales y equipo

En la investigación se utilizaron muestras de cinco órdenes de suelos para el ensayo, balanza analítica, mallas metálicas, horno de secado Marca WTB Binder Modelo 155330000202, espectrofotómetro de emisión y absorción atómica, acetato de sodio, acetato de amonio, solución extractora a diferentes niveles de pH, alcohol etílico al 90%, óxido de lantano, beaker embudos de percolación, gradillas de madera, algodón, computadora Sony Flip14a, papel filtro, agua destilada, equipo de muestreo de suelo. Los materiales fueron proporcionados por el Departamento de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

4.1.1 Localización del área experimental

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de microbiología de suelos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, en el municipio de Palmira, Valle del Cauca, con coordenadas geográficas 3°31'1" latitud norte 76°18'0" longitud Oeste. El sitio se encuentra a una altura de 1050 msnm, con una temperatura media de 24 °C y una humedad relativa de 70 % (Montenegro 2008).

4.1.2 Experimento

Se instaló un experimento para evaluar el proceso dinámico de cambio de cationes en cinco órdenes de suelo saturados dieciocho horas con una solución de acetato amonio y la misma

cantidad de tiempo con acetato de sodio para promover la adsorción y liberación de las bases de bases de cambio (Na, K, Ca, Mg).

4.1.3 Factor bajo estudio

Factor A. está compuesto por cinco ordenes de suelo inceptisol, entisol, vertisol, oxisol y molisol

4.1.4 Unidad experimental

Estuvo conformada por una sección de gradillas de madera que poseía 5 orificios. Tuvo 5 tratamientos por gradilla, en total 4 gradillas 25 muestras de suelo.

4.1.5 Tratamientos

Los tratamientos estuvieron compuestos por 5 órdenes de suelo de los cuales se pesaron 5 gr de cada uno y se sometieron a una saturación con 50 ml de acetato de amonio 1N a pH 7.0 durante 8 horas después de esto se saturaron las mismas muestras con acetato de sodio 1N a pH 8.2 durante 8 horas (cuadro1).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos en estudio

Tratamiento	Ordenes de suelo	Acetato de Amonio pH7, 8 horas	Acetato de sodio pH 8.2, 8 horas
T1	Inceptisol	50 ml	50 ml
T2	Entisol	50 ml	50 ml
T3	Vertisol	50 ml	50 ml
T4	Oxisol	50 ml	50 ml
T5	Molisol	50 ml	50 ml

4.1.6 Diseño experimental

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar, los tratamientos a evaluar fueron 5 órdenes de suelo saturados con acetato de amonio 1N a pH 7.0 y acetato de sodio 1N a pH 8.2, con 4 repeticiones cada tratamiento más un blanco sin aplicación de muestra como cero instrumental.

4.1.7 Modelo estadístico

En este estudio unifactorial, se utilizó como herramienta principal el ANAVA con el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y= variable de respuesta observada

i= i-esimo tratamiento

j= j-esima repetición

μ = Es la media poblacional de la variable respuesta

τ_i = es el efecto del i- esimo tratamiento

ε_{ij} = error experimental

4.2 Manejo del experimento

4.2.1 Recolección de muestras de suelo

La selección de las 5 órdenes de suelo se ubica sobre la margen derecha del río Cauca, extendiéndose desde el sur del departamento en el municipio de Jamundí hasta el norte en el municipio de La Unión.

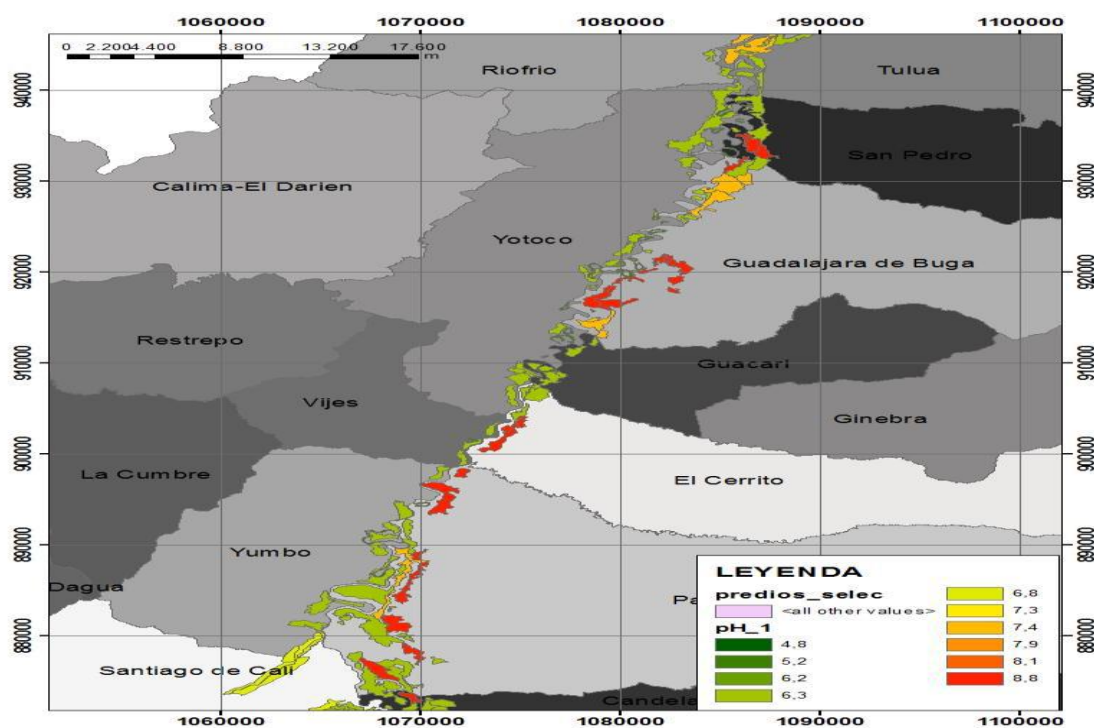


Figura 1. Zona de recolección de muestras de suelo para la estimación de la CIC

4.3 Variables evaluadas

4.3.1 pH del suelo

El pH se determinó de manera general en las cinco ordenes de suelo haciendo uso del potenciómetro, utilizando una solución tampón de un rango de pH. 4, 7 y 10 para calibrar el equipo en estos tres puntos de acidez conocida. Una vez calibrado, se introdujo el sensor en la muestra que fue preparada previamente con 10 gramos de suelo seco tamizado a 2 milímetros mezclando con 50 mililitros de agua destilada formando una mezcla homogénea.

4.3.2 Porcentaje de arcilla en el suelo (%)

Para la determinación del porcentaje de arcilla presente en el suelo se hizo uso del hidrómetro de Bouyoucos graduado a 20 °C, para indicar la concentración de g/l, teniendo una densidad de partículas de 6,65 g/ml, usando como medio de suspensión agua destilada pura, realizando la lectura al fondo del menisco formado por el líquido sobre la escala.

La densidad de la fase líquida se efectuó con variaciones de temperatura y con la presencia de hexametafosfato de sodio como agente dispersante. La presencia neta de estas partículas (menos de la densidad de partículas) se designó como corrección compuesta y se pudo determinar experimentalmente de la siguiente forma:

Se pesó 50 gramos de suelo seco al aire tamizado en una malla de dos milímetros de cada orden y se colocó en una probeta graduada a 1000 ml, luego se agregó 100 ml de agua destilada y 10 ml al agente dispersante. Se dejó reposar durante 5 minutos y luego se agitó durante el mismo tiempo en la licuadora.

Después de agitar, se depositó todo el contenido en un cilindro de 1000 ml, cuidando de no perder material de suelo, luego se completó el volumen con el hidrómetro dentro. Una vez

hecho esto, se procedió a agitar la suspensión con el embolo, unas 10 veces para lograr homogeneidad en la suspensión, midiendo la temperatura de la suspensión a cada lectura efectuada, con el fin de obtener el factor de corrección. Las lecturas efectuadas fueron a los 40 segundos la primera y a las 2 horas la segunda lectura.

4.3.2 Contenido de materia orgánica

Para determinar el contenido de materia orgánica del suelo se procedió a calcinar la muestra a 650 °C. La pérdida de peso al calcinar la muestra se atribuye a la presencia de materia orgánica la cual se expresa en porcentaje.

El método para la determinación de la materia orgánica del suelo consistió en lo siguiente: Se pesó una muestra de 10 gr de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm y se colocó en crisoles de porcelana. Se procedió a secar en conjunto la muestra y el crisol en horno a una temperatura de 105 °C hasta alcanzar un peso constante durante 24 horas, posteriormente se retiró del horno y se dejó enfriar en desecador, luego se pesó una vez más.

Se colocaron las muestras en crisoles de porcelana en una mufla a 650 °C, durante 2 horas, trascurrido ese tiempo se retiró las muestras, se dejándose enfriar en un desecador y una vez frías las muestras se pesaron nuevamente. La diferencia de peso encontrada equivale a la cantidad de materia orgánica que posee el suelo la cual se perdió por efecto de la calcinación a una temperatura elevada.

4.3.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) el primer paso consistió en preparar los embudos de percolación (columnas de intercambio) realizando una prueba en blanco para ello se taparon los embudos con algodón ligeramente apretada en total de 20 embudos menos 1.

Una vez preparados los embudos se puso en cada uno de ellos salvo en el blanco 5 g de suelo tamizado a 2 mm seco al aire añadiéndose acetato de amoníaco 1N a pH 7.0 hasta los 4/5 de la capacidad del embudo y se cerró el drenaje del mismo dejándose en reposo un mínimo de 8 horas para que se produzca el intercambio.

Transcurrido este tiempo se procedió a abrir los embudos y recogerse el lixiviado y enrazándolo en matraces aforados de 100 ml en este lixiviado se midieron las bases de cambio: Na y K por fotometría de llama emisión atómica y Ca Mg por absorción atómica. Se rellenaron nuevamente los embudos hasta los 4/5 de su capacidad, pero esta vez con acetato sódico 1N a pH 8.2 dejándose de igual manera un mínimo de 8 horas para que se produzca el intercambio. Una vez que hubo transcurrido ese tiempo se dejó salir el lixiviado que fue desechado, para limpiar el exceso de sodio aquel que no fue adsorbido por el complejo de cambio se lavaron los embudos varias veces con alcohol etílico al 80%.

Una vez realizado lo anterior se añadió de nuevo acetato amónico 1N a pH 7.0 hasta los cuatro en reposo con la intención de que se produzca el intercambio de iones una vez transcurridas las 8 horas se recogió y enrazó el lixiviado en matraces de 100 ml. En este último lixiviado se midió el de sodio por fotometría de llama este resultado corresponde a la capacidad de intercambio catiónico total.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con el análisis físico químico de los cinco suelos utilizados en el experimento, se observaron características en cada uno, como el pH, textura y M.O (cuadro 2).

5.1 Textura del suelo

Para la determinación de la textura se realizó el análisis a cinco órdenes de suelo, encontrándose en cuatro de ellos, que la arcilla es predominante con porcentajes entre 30%-60%, excepto el orden vertisol que presento un 21% (cuadro 2).

Durante la determinación de la textura con el hidrómetro Bouyoucos se identificó que se producía la floculación completa a las 2 horas de suspendida la agitación en los 5 suelos estudiados. Se tomó como variable independiente a los porcentajes de arcillas, limo y arenas, mostrando una diferencia en la interacción del porcentaje de cada uno de ellos, en cada orden de suelo.

Cuadro 2. Análisis de suelo realizada en cinco ordenes

Característica	Inceptisol	Entisol	Vertisol	Oxisol	Molisol
Textura	Franco arcilloso	Arcillo limoso	Franco	Arcillo arenoso	Arcilloso
Arena	26.8%	18.24%	46%	40.24%	14.24%
Limo	40%	36%	32%	12%	12%
Arcilla	32.2 %	45.76%	21%	47.76%	50.76%
pH	6.65	5.96	4.92	3.99	6.69
M.O	2.25%	3.38%	3.92%	3.51%	3.66%

Se observó que estos ordenes se componen de partículas que varían ampliamente y la distribución proporcional de las partículas minerales determinan de manera considerable muchas de las propiedades básicas de los mismos, como ser: el drenaje, porosidad y la plasticidad.

Las clases de textura identificadas en cada orden pueden agruparse de manera general en: arcilloso, franco, limoso y arenoso. De la combinación de éstos nombres se puede predecir la proporción intermedia que genera la textura presente en cada orden según el triángulo de textura de los suelos.

Existe una relación entre la clase textural del orden entisol que presenta una textura arcillo limoso debido a la predominancia de limo y arcilla en su estructura física y el orden oxisol, que muestra una textura arcillo arenoso por la abundancia de arena. Los contenidos de arcilla que presentan ambos ordenes son similares, y se notó en ellos que, en condiciones húmedas resultan pegajoso, la diferencia es que al tacto el orden oxisol es más áspero y se sienten gránulos de arena, mientras que el entisol es más suave y se adhiere un poco más a los dedos.

El orden molisol presentó una textura que al tacto es la más plástica y adhesiva entre todos los órdenes, debido al elevado contenido de arcilla (50.76 %). Este orden carece de una adecuada aireación y muestra una baja porosidad. Por lo antes mencionado, el mismo es difícil de trabajar por su elevada viscosidad, presentando gran resistencia para la penetración de las raíces.

El orden vertisol no presentó similitud con ninguna de los demás ordenes, por lo tanto, este suelo corresponde a la mejor textura, donde las cantidades de los componentes de la textura (arena, limo y arcilla) del suelo se encontraron en proporciones óptimas o muy próximos a ella.

Se espera que este suelo sea de elevada productividad agrícola, debido a su textura relativamente suelta, heredada de la arena, a su fertilidad procedente de los limos incluidos y al mismo tiempo con adecuada retención de humedad por la arcilla presente. Este orden mostró proporciones adecuadas de arena, limo y arcilla, que le dan una excelente condición para el desarrollo y funcionamiento de los vegetales.

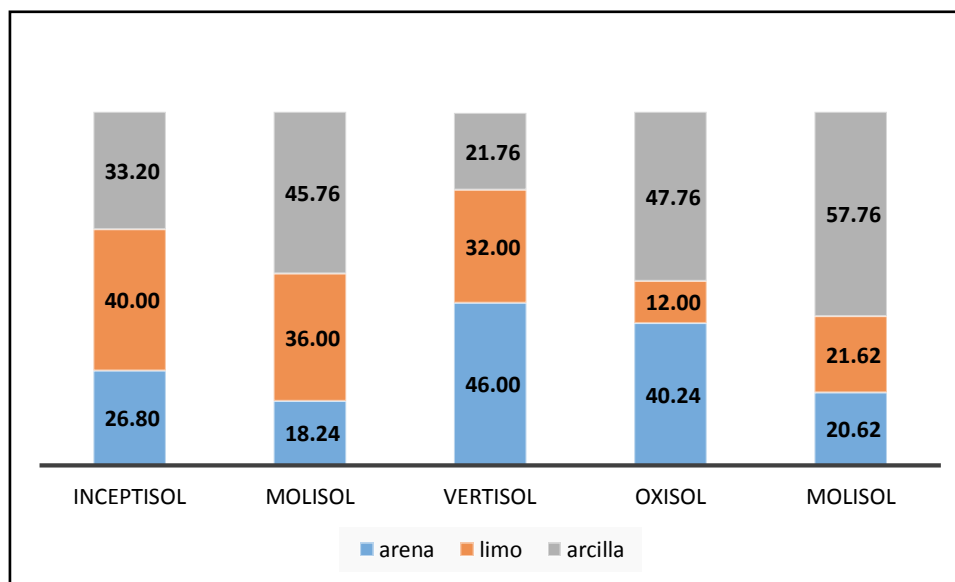


Figura 2. Porcentajes de limo, arcilla y arena que conforman la textura de cinco ordenes de suelo del Valle del Cauca.

La textura de los cinco órdenes es diferente entre sí, esto debido a que la interacción de los porcentajes de arena, limo y arcilla se encuentran presentes en una distribución distinta entre cada orden.

5.2 pH del suelo

Según ANAVA (Anexos 4), para el nivel de pH encontrado en los diferentes órdenes de suelo existe una diferencia altamente significativa ($P < 0.05$), siendo los cinco tratamientos diferentes, presentando el nivel más alto de pH el orden molisol y el menor el oxisol.

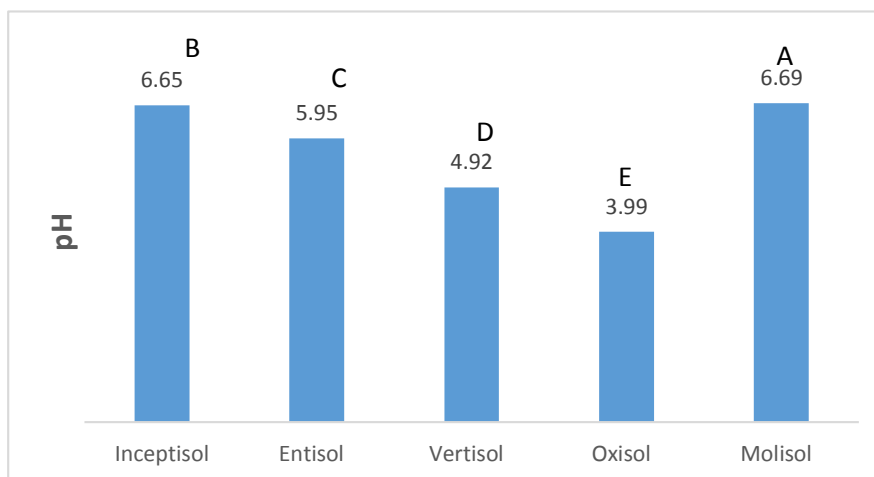


Figura 3. Nivel de pH de cinco órdenes de suelos en el valle del cauca

De acuerdo con la figura 4 el pH varía en cada orden ya que las características de cada suelo son diferentes entre sí, el orden oxisol y vertisol son los que presentan el pH más bajo, a diferencia a las ordenes inceptisol, entisol y molisol que se mantienen en el rango de lo ideal para producción agrícola.

El pH del suelo mide la actividad de los H^+ libres en la solución del mismo, es decir la llamada acidez actual y la medida de los H^+ fijados sobre el complejo de cambio es la llamada acidez potencial. Los suelos tienen tendencia a acidificarse. Primero se descalcifican, ya que el calcio es absorbido por los cultivos o desplazado del complejo de cambio por otros cationes y emigra a capas más profundas con el agua de lluvia o riego. De acuerdo con la FAO (2008) después de este proceso lo normal que los que los iones H^+ ocupen los huecos que dejan el Ca^{2+} y el Mg^{2+} en el complejo de cambio (Figura 3).

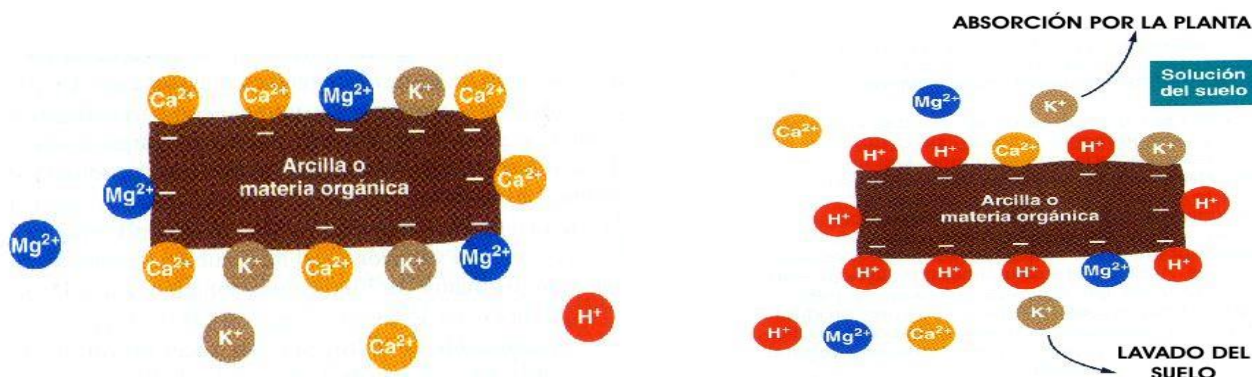


Figura 4. Actividad de los H^{+} libres en la solución del suelo

Al determinar el pH se encontró que el orden oxisol y vertisol muestran niveles bajos en la escala de pH, para el orden oxisol se debe a la abundante presencia de sesquióxidos de hierro y aluminio libres, que por naturaleza es característico de este tipo de suelo, y la causa en el orden vertisol está relacionada al uso de fertilizantes nitrogenados que ejercen una acción acidificante sobre el suelo.

Al ser estos ordenes fuertemente ácidos el aluminio y maganeso se vuelven muy solubles y tóxicos para las plantas, desplazando al potasio, calcio y magnesio, lo que provoca una reducción en la capacidad de intercambio catiónico.

Se observó que el pH de los órdenes inceptisol, entisol y molisol controla muchos procesos químicos que tienen lugar en el suelo, como la disponibilidad de los nutrientes. El pH que muestran estos ordenes es considerado adecuado en la agricultura con un rango de acidez entre 5.96 -6.69. En función de estos valores, los órdenes antes mencionados pueden obtener buenos rendimientos agropecuarios. Sin embargo, muchas plantas se han adaptado para desarrollarse a valores de pH fuera del rango que presentan estos.

La medición del pH permitió una primera aproximación con vistas a conocer el grado de saturación de bases del complejo de cambio. Cuando los iones básicos y ácidos están equilibrados, existe una relación entre el pH y el grado de saturación de tal complejo, siendo

alta la relación para los dos extremos (ácido, frente a muy básicos o alcalinos) pero no en los valores o rangos intermedios.

Lo anterior radica en que los iones ácidos son variados en su comportamiento, por lo que cada uno tiende a modificar el pH de forma diferente, esta observación permite contraponer que, aunque el pH de los órdenes inceptisol, entisol y molisol son similares puedan tener grados de saturación de bases diferentes.

5.3 Materia orgánica en el suelo

Según ANAVA (Anexos 5), para la cantidad de materia orgánica encontrada en los diferentes órdenes de suelo existe una diferencia altamente significativa ($P < 0.05$), siendo los cinco tratamientos diferentes, presentando la mayor concentración el orden vertisol y la menor el inceptisol

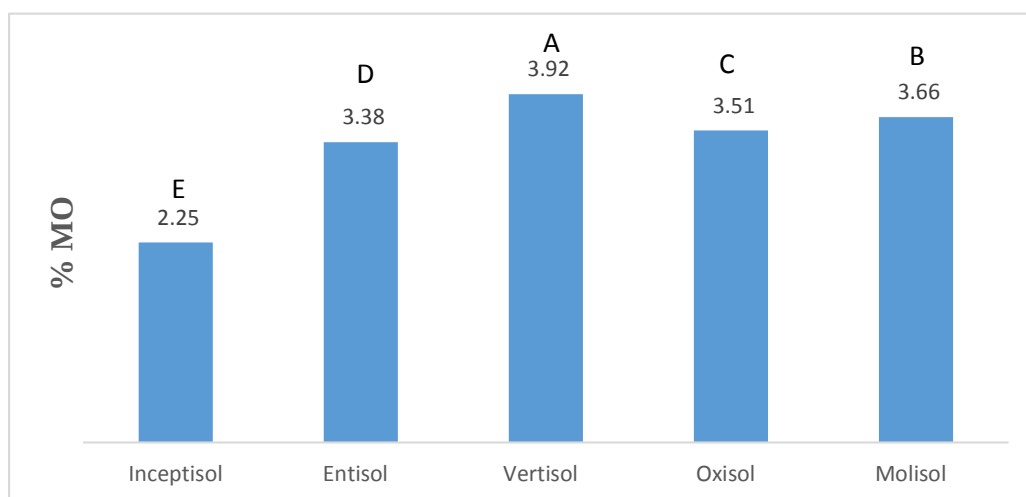


Figura 5. Cantidad de materia orgánica en cinco órdenes de suelo del valle del Cauca.

Cuando se comparó la cantidad de materia orgánica encontrada en las cinco ordenes de suelos se encontró que Inseptisol presenta el nivel más bajo, al compararlo con los parámetros establecidos (Anexo 2) se observa que está en un rango normal, mientras que entisol está en

un rango alto, para el caso de vertisol, oxisol y molisol están en un rango considerado muy alto.

La materia orgánica de estos ordenes de suelo proviene de la descomposición de los seres vivos que mueren sobre ella, como de la actividad biológica de los organismos que la descomponen y de los restos de vegetales.

Al someter las muestras de cada orden de suelo a una temperatura de 650 °C durante dos horas se produjo en ellas una oxidación, debido a que todos los compuestos que se encuentran en los tejidos vegetales están sujetos a sufrir este tipo de cambio, a causa que la fracción orgánica que los materiales vegetales están compuestos mayormente por carbono e hidrogeno.

El orden vertisol mostró un contenido relativamente alto de materia orgánica (3.92%) produciendo una mayor actividad microbiológica que mejora las siguientes condiciones físicas: porosidad y aireación; creando así un ambiente de reserva en la vida productiva de este suelo. Por lo tanto, esta orden es fértil a consecuencia de las condiciones que aporta la materia orgánica.

De acuerdo con la zona donde se recolectaron las muestras de suelo de los órdenes entisol, oxisol y molisol y a la proximidad que éstas tienen con el río Cauca se puede decir que existe una mayor vegetación, por lo tanto, tenemos constantes aportes de material vegetal que a la vez son fuentes de materia orgánica justificando así que estas órdenes registren valores altos.

En cuanto al orden inceptisol se registró menos contenido de materia orgánica (2.25%) en relación con los demás ordenes, al comparar este valor con los parámetros establecidos de 1.0-1.9 como un nivel bajo; 2.0-2.5 como normal y 2.6-3.5 como altos, encontramos este orden dentro del rango ideal, esto se debe a una reducción de la materia orgánica, argumentando también que es un suelo joven y en formación. Se puede asociar una disminución de la actividad microbiana.

5.4 Capacidad de intercambio catiónico de cinco órdenes de suelo.

A continuación, se muestran los resultados de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de cinco órdenes de suelo y los cationes predominantes en cada uno de ellos los cuales son: K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , estos también son considerados cationes intercambiables, porque pueden ser reemplazados por otros cationes presentes en la solución del suelo.

Cuadro 3. Capacidad de intercambio catiónico y cantidad de bases de cambio en meq/100g

Característica	Inceptisol	Entisol	Vertisol	Oxisol	Molisol
Calcio (Ca)	14.67 A	12.99 A	12.09 A	10.48 A	17.62 A
Magnesio(Mg)	1.78 A	2.33 AB	1.95 AB	0.84 B	1.30 A
Potasio (K)	0.30 B	0.40 B	0.40 B	0.50 B	1.06 A
Sodio (Na)	0.51 A	0.11 B	0.09 B	0.03 B	0.10 B
CIC	16.64 AB	18.02 AB	15.39 BC	11.03 C	19.21 A

Nota. Promedio con letra igual en la misma fila no son estadísticamente diferentes (Tukey>0.05)

5.4.1 Calcio intercambiable

Según el ANAVA (Anexo 6) no existe diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) entre las ordenes de suelo en relación a la concentración de calcio, aunque la mayor cantidad registrada para este elemento fue por molisol mientras que la menor concentración la presento el orden oxisol.

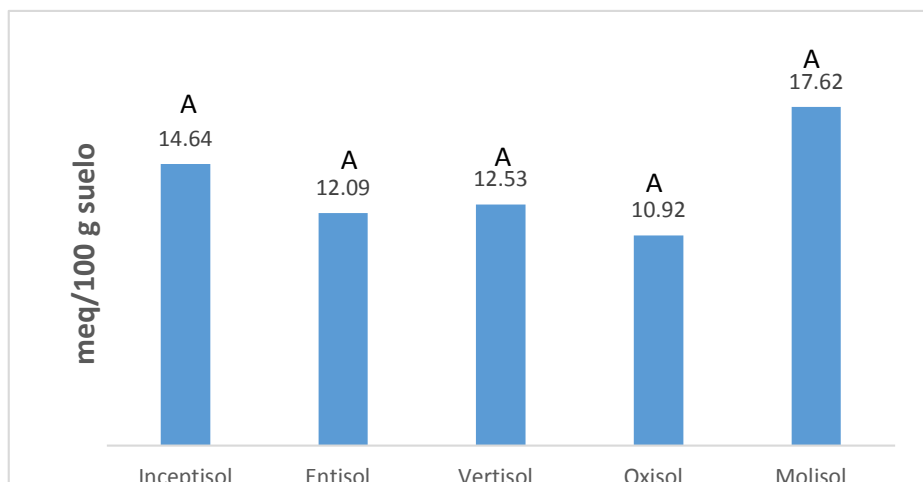


Figura 6. Calcio en cinco órdenes de suelo del valle del cauca.

Cuando se comparó la cantidad de calcio encontrada en las cinco ordenes de suelos se encontró que oxisol presenta el nivel más bajo, al compararlo con los parámetros establecidos (Anexo 2) se observa que está en un rango bajo, mientras que molisol está en un rango alto, para el caso de inceptisol, entisol y vertisol están en un rango considerado muy alto (figura 6).

El contenido medio de calcio en la corteza terrestre es 3,64%, es el quinto elemento más abundante. En los diferentes tipos de suelo varía ampliamente dependiendo principalmente de los materiales de origen y del grado en que la meteorización y la lixiviación han influenciado el proceso de edafización.

La meteorización de los minerales primarios ricos en calcio depende fundamentalmente de la presencia de hidrogeniones y agentes quelantes, que liberan el calcio de la estructura de los minerales, causando la disolución de los mismos. Igualmente, los protones son capaces de desplazar al calcio de sus posiciones en los coloides del suelo, favoreciendo su lixiviación bajo condiciones de clima húmedo (Makeyev y Berkgaut 1989).

Partiendo del principio que una sustanciosa cantidad de calcio es adsorbida por los coloides del suelo, además que este es el catión predominante en el complejo de cambio, entonces por

la fuerza con la que el Ca^{+2} es retenido por los coloides, sería deseable un porcentaje de ocupación del 70-80% de esas posiciones de cambio para poder tener un correcto equilibrio nutricional en las plantas.

La disposición de las bases de cambio según la energía de adsorción a los coloides del suelo es: $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$. Este calcio cambiante es muy importante para la estructura del suelo, ya que provoca la floculación de los coloides del suelo, mejorando su estructura y estabilidad.

El Ca^{+2} en el orden molisol es alto, lo que ocasiona que este suelo tenga menos riesgos de erosión ya que el Ca^{+2} forma puentes con arcillas y ácido húmico, logrando crear una especie de columnas que soportan los agregados del suelo para que éstos mantengan su forma y no se destruyan por efectos de la erosión. De igual manera, la presencia de calcio en el orden molisol es indispensable para lograr que los otros elementos, especialmente los cationes, estén disponibles para la planta.

Aparentemente la liberación del Ca^{2+} absorbido en el orden oxisol depende de la acidez del mismo, en tales condiciones la concentración más baja de calcio se encontró en esta orden de suelo, al ser un suelo con poco calcio también es un suelo con una capacidad de intercambio catiónico bajas tales condiciones se dan mayormente en suelos tropicales que tienen un predominio de Al, así mismo en suelos con textura arenosa y muy ácidos.

Los órdenes inceptisol, entisol y vertisol cuentan con cantidades de Ca normales entre 12.09 meq/100 g - 14.69 meq/100 g, lo que contribuye a la disponibilidad de Ca^{+2} para las plantas, debido a la existencia de cantidades normales de calcio desplazando el hidrógeno (H) presente en la superficie de las partículas de suelo, disminuyendo la acidez.

5.4.2 Magnesio de cambio

según el ANAVA (Anexo 7), no existe diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) entre las ordenes de suelo en relación a la concentración de magnesio, aunque la mayor cantidad registrada para este elemento fue en el entisol mientras que la menor concentración la presentó el orden oxisol

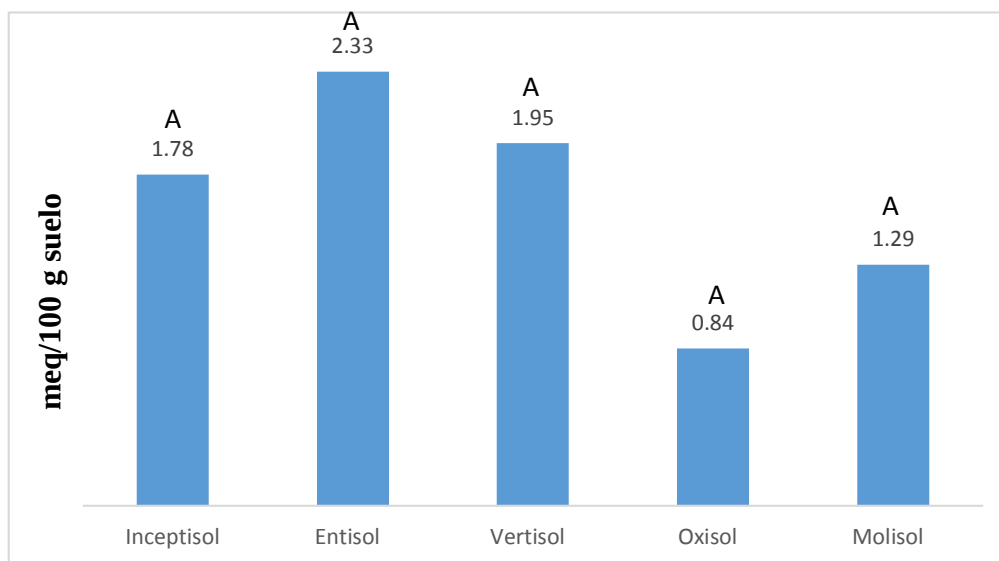


Figura 7. Magnesio cambiante en cinco órdenes de suelo del Valle del Cauca.

Cuando se comparó la cantidad magnesio encontrada en las cinco ordenes de suelos se encontró que entisol presenta el nivel más alto, al compararlo con los parámetros establecidos (Anexo 2) se observa que está en un rango alto, mientras que inceptisol, vertisol y molisol está en un rango normal, para el caso de oxisol están en un rango considerado bajo.

El magnesio (Mg) es el octavo elemento más común en la litosfera, con una concentración promedio cercana a 2.1%. Pese a lo anterior, y como consecuencia de la meteorización de minerales de Mg relativamente solubles, su concentración en los suelos es de tan solo 0,5%, hecho que indica una pérdida de éste representada en $\frac{3}{4}$ partes del total (Barber, 1995).

Los iones de Mg^{2+} que se encuentran en la solución del suelo son una fracción intercambiable que al encontrarse electrostáticamente fijada a la materia orgánica o minerales arcillosos su liberación depende del efecto que tiene la absorción de un Mg^{2+} en la solución del suelo del equilibrio con la fase fracción intercambiable.

Dados los diferentes grados de meteorización y materiales parentales, los contenidos de Mg^{2+} varían entre cada orden, en este sentido se reportan valores bajos (0.84 meq/100gr) para el orden oxisol mientras que para el orden entisol valores altos (2.33 meq/100 gr).

El orden entisol resultó ser el suelo más rico en Mg^{2+} debido a disponibilidad en la que se encuentra, se entiende que este no es un componente de los minerales primarios del suelo, por lo tanto, se puede decir que el proceso de descomposición de los minerales en este orden es más rápido, siendo Mg^{2+} disponible el resultado de este fenómeno.

Las concentraciones de Mg^{2+} en el complejo de cambio varían según el material parental, tipo de arcilla, la textura, presencia de otros cationes, la acidez, la lluvia, extracción por los cultivos y los aportes vía fertilización y enclavamiento.

En la determinación del Mg^{2+} disponible se observó que este ion se encuentra adsorbido electrostáticamente a las partículas de arcilla y materia orgánica, dependiendo su liberación del efecto que tiene la absorción de un Mg^{2+} en la solución del suelo y también el equilibrio con la fracción intercambiable.

En los órdenes inceptisol, vertisol y molisol se obtuvieron valores entre (1.30-1.78 meq/100gr) comprendido entre lo normal, considerando que estos valores óptimos dependen de arcilla y pH, en este sentido las deficiencias de Mg^{2+} tienden a ocurrir cuando los suelos son ácidos, arenosos, altamente lavados y con baja capacidad de intercambio catiónico.

5.4.3 Potasio de cambio.

Según el ANAVA (Anexo 8) existe diferencia altamente significativa siendo el orden molisol mostró la mayor cantidad de potasio, mientras que las otras cuatro órdenes estadísticamente presenta la misma cantidad de este elemento no habiendo diferencia estadística entre ellas.

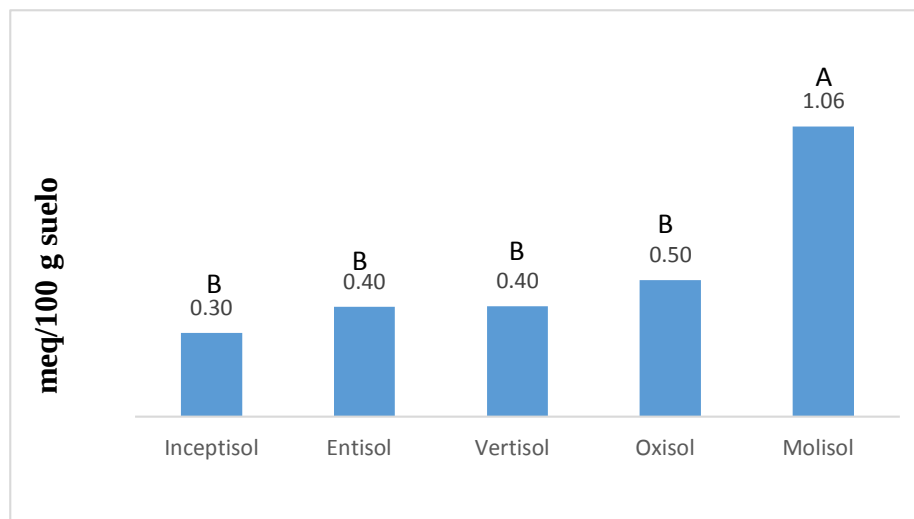


Figura 8. potasio cambiabile cinco órdenes de suelo del Valle del Cauca

Cuando se comparó la cantidad de potasio se encontró en las cinco ordenes de suelos el único orden que presenta un nivel normal es el molisol, al compararlo con los parámetros establecidos (Anexo 2), mientras que inceptisol, entisol y vertisol y oxisol está en un rango bajo.

La base para la clasificación de las formas del potasio en el suelo, está fundamentado en la disponibilidad para la absorción de parte de la solución del suelo. Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones ambientales, la disponibilidad de potasio puede variar.

Si bien es cierto la disponibilidad del K^+ en el suelo difiere también de acuerdo con la humedad (la mayor parte del K se mueve en el suelo hacia las raíces por difusión en la

solución del suelo); también la profundidad del suelo y el abastecimiento de capas del subsuelo pueden jugar un rol importante que debe ser tomado en cuenta en la interpretación de los resultados (Bazele.1988).

El potasio encontrado en las cinco órdenes de suelo está formando la fracción intercambiable que se encuentra disponible, y que las plantas pueden extraer fácilmente. Esta fracción de potasio está contenida en la superficie de las partículas de arcilla y materia orgánica y podemos decir que se encuentra en equilibrio con la solución del suelo.

Aunque el potasio disuelto en la solución de cada orden de suelo está inmediatamente disponible para las plantas. las cantidades que se encontraron en estos cinco tipos de suelos son muy pequeñas. Por lo tanto, el potasio medido no representa la cantidad total de potasio disponible para las plantas. Los datos señalan al orden molisol como un suelo con alta cantidad de potasio (1.30 meq/100g)

La concentración de iones de potasio en los órdenes Entisol y Vertisol resultò constante (0.40 meq/100 g) para ambos órdenes. La baja de potasio en estos suelos está relacionada con el lavado y erosión esto debido a la inclinación de la pendiente y la poca cobertura vegetal.

De igual manera el orden oxisol (0.50 meq/100g) e inceptisol (0.30 meq/100g) cuenta con concentraciones bajas esto debido a que los iones de K^+ intercambiables no pueden desplazarse a menos que sean sustituidos por otros cationes en los sitios de intercambio, estos ordenes son de uso agrícola y cuando las plantas absorben K^+ del suelo, disminuye su concentración.

5.4.4 Sodio de cambio

Según el ANAVA (Anexo 9) existe diferencia altamente significativa siendo el orden molisol quien mostro la mayor cantidad de sodio, mientras que los otros cuatro órdenes estadísticamente presentan la misma cantidad de este elemento no habiendo diferencia estadística entre ellas.

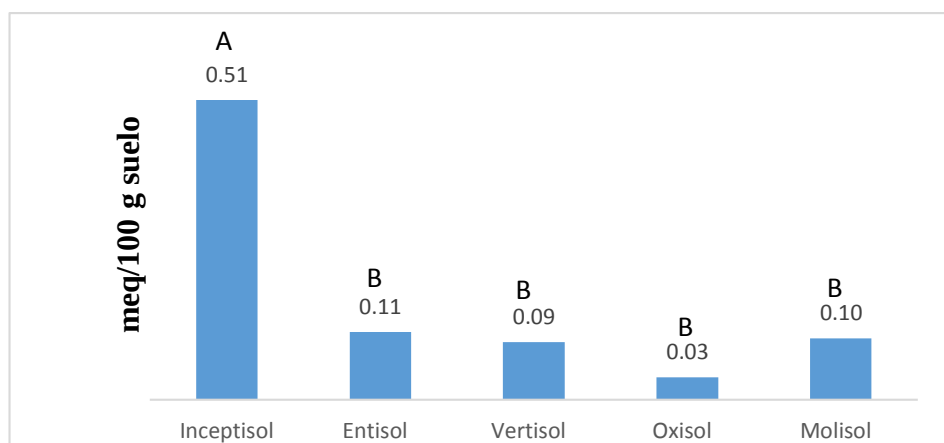


Figura 9. Sodio de cambio en cinco órdenes de suelo del Valle del Cauca

Normalmente el sodio intercambiable del suelo suele ser mayor que el sodio soluble usualmente como lo corrobora el presente estudio, dicho de otra forma, entre un 20 y un 50 % del Sodio que aparece en el análisis de suelo puede ser extraído por el agua.

El exceso de sodio intercambiable tiene efecto adverso sobre el crecimiento de plantas y estructura del suelo, su resultado se traduce en reducción en los rendimientos de cultivos, en estos ordenes las partículas de arcilla tienden a separarse. En los resultados se observó que los órdenes de suelo no tienen problemas por acumulación de sodio ya que todos los tratamientos se encuentran por debajo de los 0.50 meq/100 g siendo esta cantidad de sodio normal y menos de esta cantidad se considera bajo.

4.4.5 Estimación de la CIC

Según el ANAVA (Anexo 10) se encontraron diferencias altamente significativas entre los órdenes, siendo estadísticamente iguales molisol y entisol presentando a su vez la CIC mas alta, mientras que los órdenes inceptisol y vertisol son iguales presentando una CIC intermedia para el caso de oxisol presento la CIC más baja.

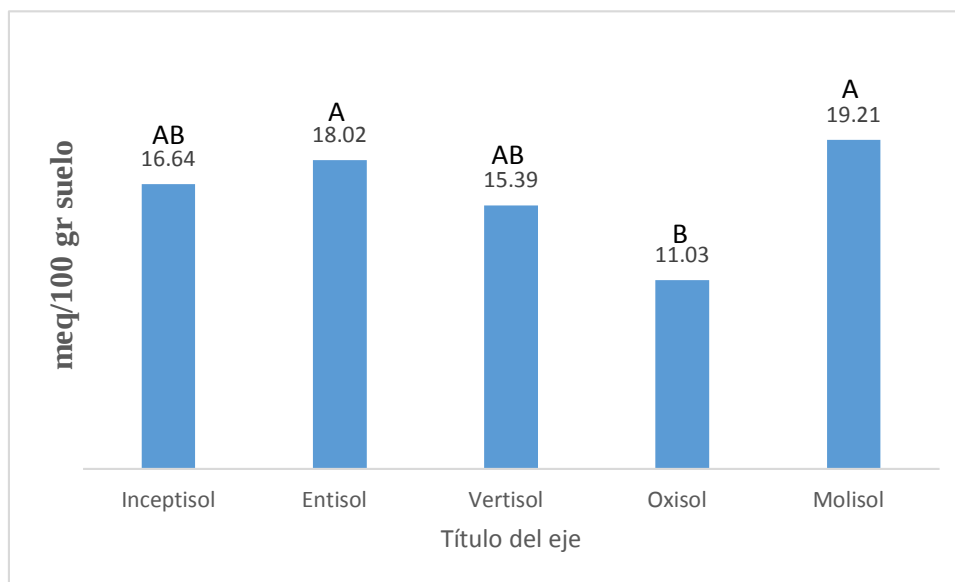


Figura 12. Capacidad de intercambio catiónico de cinco ordenes de suelo del Valle del Cauca

Cuando se compara CIC encontrada en las cinco ordenes de suelos se encuentra que molisol presenta el nivel más alto, al compararlo con los parámetros establecidos (Anexo 2) se observa que está en un rango normal muy cercano a alto, mientras que oxisol está en un rango bajo, para el caso de vertisol, oxisol y inceptisol están en un rango considerado normal.

Los cationes retenidos por el suelo pueden ser reemplazados por otros, Esto significa que son intercambiables. Por ejemplo, el Ca^{++} puede ser intercambiado por H^{+} y/o K^{+} y viceversa. Al número total de cationes intercambiables que un suelo puede retener se le denomina capacidad de intercambio catiónico o CIC. Mientras mayor sea la CIC más cationes puede retener el suelo (figura 10).

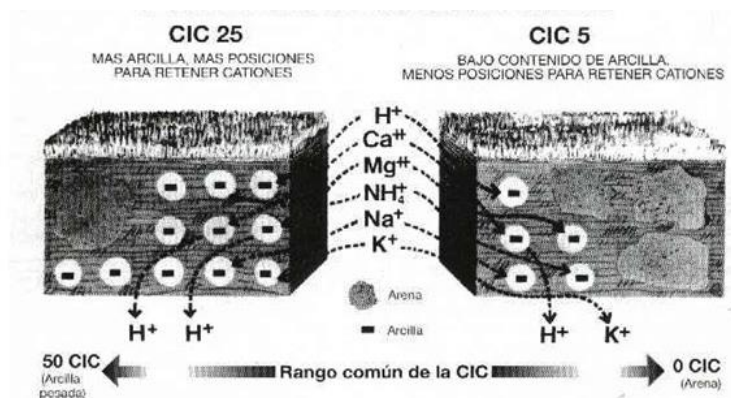


Figura 10. Visión esquemática del intercambio catiónico en un suelo

Si bien las plantas absorben sus nutrientes de las soluciones acuosas del suelo, existe un equilibrio entre la concentración de iones en aquellas y los que son retenidos por la fase sólida o matriz del suelo.

Tal equilibrio es bastante complejo, ya que según los estudiado este balance depende de variables como la naturaleza del ión, la de la partícula que lo absorbe y el pH, entre otras. De un modo muy general, podríamos decir que se denomina complejo de cambio al conjunto de partículas con capacidad para adsorber los iones de las soluciones del suelo. Tal hecho confiere a los suelos unas propiedades muy particulares que benefician tanto el desarrollo de los cultivos y la vegetación en general.

En realidad, existen varios tipos de partículas capaces de absorber y retener los iones en el medio edáfico. Sin embargo, de las que fueron consideradas en el estudio figuran las arcillas y la materia orgánica. Estas partículas retienen y liberan nutrientes cargados positivamente (figura 11)

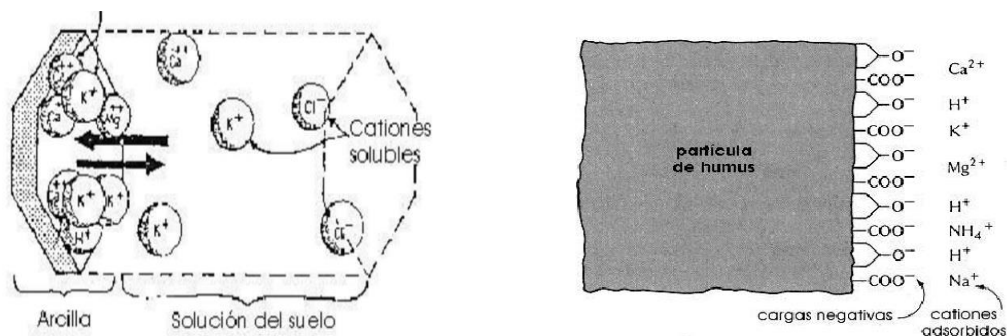


Figura 11. Dinámica de cambio de las arcillas y materia orgánica

En base a resultados se encontró que el humus tiene una capacidad de intercambio de cationes (CIC) mayor la arcilla y generalmente es responsable de gran parte de la CIC reteniendo en mayor cantidad los cationes potasio, calcio y magnesio. Del mismo modo respecto a la estructura y dinámica del complejo absorbente a través del método utilizado en la determinación de la CIC se puede diferenciar entre dos tipos de iones, que pueden ser retenidos; por un lado, se encontró con aquellos que anteriormente han sido generadores de acidez se habla más concretamente de los iones H^+ y el Al^{3+} . que en conjunto se llamaría acidez cambiabile.

La otra categoría está constituida por los denominados iones básicos es decir Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ principalmente. Por tanto, cuando dominan los del primer grupo, el suelo será marcadamente ácido y el desarrollo de la vegetación muy precario; por el contrario, el complejo de cambio está casi o totalmente saturado de los iones básicos, así como sucede en los órdenes inceptisol, entisol y molisol; el ambiente iónico de estos suelos es neutro e incluso moderadamente alcalino.

Según se muestra en los datos el cuadro 3 el orden molisol presenta la mayor la CIC debido a que en este orden la cantidad de arcilla es alta al igual que la materia orgánica.

Al analizar los resultados de la CIC que exhibe el orden oxisol se observó que en este suelo las variables de influencia en la CIC (pH, arcilla y MO) están en condiciones de manifestar una reducción en el proceso dinámico de cambio catiónico. Se habla del pH en este suelo es extremadamente ácido mostrando una baja saturación de calcio que es la base que mayor participación tienen en la CIC del suelo, al igual que al considerar la arcilla en este suelo es relativamente más baja que el suelo molisol; sin embargo, aunque la materia orgánica en este sea alta no aumenta su CIC.

VI. CONCLUSIONES

Para la base de cambio calcio en los tratamientos inceptisol, entisol, vertisol, oxisol y molisol se contabilizo una concentración comprendida entre 10.92 meq/100 gr – 17.62 meq/100 g, para magnesio entre 0.84 meq/100 g – 2.33 meq/100 g, para potasio entre 0.30 meq/100 g – 1.06 meq/ 100 g y para sodio entre 0.03 meq/100 g – 0.51 meq/100 g.

La presencia de la arcilla y la materia orgánica y el nivel de pH es directamente proporcional a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de modo que, a mayor presencia de estas propiedades físico químicas (arcilla, MO y pH) existe una mayor CIC y viceversa.

El proceso dinámico de intercambio de cationes tiene lugar en la solución del suelo donde existe el cambio de un catión de la fracción coloidal cargado negativamente por una base circundante en el medio cargada positivamente.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda que se sigan haciendo determinaciones de la CIC de las mismas cinco órdenes con diferentes métodos de extracción de cationes.

Se aconseja hacer interacciones en la estimación de la CIC con diferentes tiempos de contacto del suelo con las soluciones extractoras a diferentes niveles de pH.

Se recomienda realizar estudios en el tipo de arcilla que contiene cada suelo para conocer cuál es el tipo de arcilla que exhibe mayor CIC.

Se aconseja realizar ensayos de estimación de CIC con muestras del mismo orden de suelo extraídas de diferentes zonas del país.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, J. A. 1997. Química de suelos de ALC. las Vegas, Nevada, Estados Unidos de América. Consultado el 27 de jul 2015.

AMBIENTALES. 2001. Propiedades de los suelos (En línea). Primera comunión sobre el cambio climático en Colombia. Consultado 20 jul 2015. Disponible en http://www.greenpeace.org/colombia/Global/colombia/informes/informe_todo3

ARELLANO. 2001. Generalidades de los suelos (En línea). Universidad Abierta y a Distancia de Colombia. Consultado el 20 may 2015. Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358001/Material_didactico/leccin_26_generalidades_del_suelo.html

BERNIER, R. ALFARO, M. 2007. Acidez de los suelos y efecto del encalado. Instituto de investigación agropecuaria, INA. Osorno. Boletín INA N° 151. P9-12 19-22

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

BOHN. 1993. Química del suelo (En línea). Universidad Nacional de Medellín. Consultado el 22 may 2015. Disponible en http://unvirtual.medellin.unal.edu.co/pluginfile.php/1920/mod_resource/content/0/quimica_coloides_suelos.pdf

BOSCH A.D., PORTA P., TORRES J. Treballar el sòl un art per descobrir. (En línea) Ediciones de la Universidad de Lleida. 2009. Consultado el 27 de mayo de 2016 Disponible en <http://www.publicacions.udl.cat/indice.php>

BUCKMAN, H. 1997. Naturaleza y priedades físicas de los suelos. La cal y sus relaciones con el suelo y planta. New york EE.UU. P 416- 417

CASTRO, D. 2005. Los suelos de Colombia. (En línea). Consultado 23 de junio de 2016. Disponible en <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/05loss.pdf>.

CHAVEZ, M. 1986. La acidez y el encalado de los suelos. Direccion de Investigacion y Extencion de caña. Revista Ciencia y técnica en la agricultura. La Habana, Cuba No 2. P 107-116.

IRIARTE, A. 1993 Toxicidad de aluminio y manganeso. Cochabamba, Bolivia p 10- 11.

DRAKE Y MOTTO QUEVEDO. 1998. Análisis del efecto de arcilla y materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico, laboratorio de Ciencia de los suelos. (En línea). New Jersey. Consultado el 10 de ago 2015. Disponible en <https://www.scribd.com/doc/25308671/Evaluacion-de-Metodos-para-la-Determinacion-de-la-CIC-de-Suelos>

ESTRADA.1971. La Capacidad de intercambio catiónico en suelos tropicales ácidos y factores que la afectan. (En línea). Lima Perú: departamento de suelos y geología UNA-LM. Consultada 30 may 2015. Disponible en <https://www.scribd.com/doc/25308671/Evaluacion-de-Metodos-para-la-Determinacion-de-la-CIC-de-Suelos>

FUENTES.1971. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico de algunos suelos de origen volcánicos (En línea). Turrialba, Costa Rica. Consultado 17 ago 2015.

Disponible en <https://www.scribd.com/doc/25308671/Evaluacion-de-Metodos-para-la-Determinacion-de-la-CIC-de-Suelos>

IDEAM. 2001. Instituto de hidrología y meteorología y estudios ambientales (En línea). Comunicación nacional sobre el cambio climático. Bogotá, Colombia. Consultado 20 ago 2015. Disponible en <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/36-11.pdf>

JARAMILLO.2002. El intercambio iónico (En línea). Introducción a la ciencia del suelo Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Consultado 15 ago 2015. Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358013/ContenidoEnLinea/leccin_5_clasificacin_de_suelos.html

MALAGON.2003. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Consultado 15 ago 2015. Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358013/ContenidoEnLinea/leccin_5_clasificacin_de_suelos.html

MAKEYEV Y BERKGAUT, 1989. Bases prácticas para optimizar (En línea) y asimilación del calcio consultado el 20 de junio de 2016. Disponible en http://www.infoagro.com/documentos/bases_practicas_optimizar_asimilacion_del_calcio.asp

POSADAS. 2010. Tipología de suelos colombianos. Revista académica colombiana de la ciencia, Sen. Cien. Agr. 30: 27-29.

QUEVEDO. 1987. Ciencia del suelo (En línea). Colombia. Consultada 12 de may 2015. Disponible en <https://www.scribd.com/doc/25308671/Evaluacion-de-Metodos-para-la-Determinacion-de-la-CIC-de-Suelos> 30

RAMÍREZ. 1971. Capacidad de cambio y elementos cambiables de Suelos (En línea). Clima de puna, Semiarido Y Tropical Humedo . Huamanga, Perú. Consultado 12 may 2015. Disponible en <https://www.scribd.com/doc/25308671/Evaluacion-de-Metodos-para-la-Determinacion-de-la-CIC-de-Suelos>

RHOADES.1982. Cation Exchange Capacity. Methods of soil Analysis.New York. 149 p.

SÁNCHEZ.1981. Suelos Del Trópico. Característica y Manejo. Colombia. 156 p.

ZAROR. 2000. Introducción a la ingeniería ambiental (En línea). New York: Oxford University. Consultada 10 ago 2015. Disponible en <http://www.usal.es/webusal/files/Licenciado%20en%20Ciencias%20Ambientales%202012-2013.pdf>

ZHANG Y ZHAO.1997. Chemistry of variable change (En línea). New York: Oxford University. Consultada 10 ago 2015. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706102003166>

Anexos

Anexo 1. Nivel de acidez determinados por pH

<4.5	Extremadamente ácido
4.5-5.0	Muy fuertemente ácido
5.1-5.5	Fuertemente ácido
5.6-6.0	Medianamente ácido
6.1-6.5	Ligeramente ácido
6.6-7.3	Neutro
7.4-7.8	Medianamente ácido
7.9-8.4	Moderadamente básico
8.5-9.0	Ligeramente alcalino
9.1-10.0	Alcalino
< 10	Fuertemente alcalino

Anexo 2. Interpretación de bases de cambio y CIC

Materia Orgánica	Sodio	Potasio	Calcio	Magnesio	CIC	Niveles
< 0.9	0.0-0.3	0.00-0.30	0-3.5	0.0-0.6	< 6	Muy bajo
1.0-1.9	0.3-0.6	0.30-0.60	3.5-10	0.6-1.5	6.0-12.0	Bajo
2.0-2.5	0.6-1.0	0.60-0.90	10.0-14.0	1.5-2.5	12.0-25.0	Normal
2.6-3.5	1.0-1.5	0.90-1.50	14-20	2.5-4.0	25.0-40.0	Alto
> 3.6	> 1.5	1.50-2.40	> 20	> 4.0	> 40	Muy alto

Anexo 3. Valores porcentuales de bases de cambio

Ca	60-80% de la CIC
Mg	10-20% de la CIC
K	2-6% de la CIC
Na	0-3% de la CIC

Anexo 4. Cuadro de Análisis de la Varianza de pH

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	21.34	4	5.34	5895.08	<0.0001
tratamientos	21.34	4	5.34	5895.08	<0.0001
Error	0.01	15	9.1E-04		
Total	21.35	19			

tratamientos	Medias	n	EE	E.E.
Molisol	6.68	4	0.02	A
Inceptisol	6.60	4	0.02	B
Entisol	5.95	4	0.02	C
Vertisol	4.92	4	0.02	D
Oxisol	3.99	4	0.02	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 5. Análisis de la varianza de materia orgánica

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	7.01	4	1.75	4630.19	<0.0001
tratamientos	7.01	4	1.75	4630.19	<0.0001
Error	0.01	15	3.8E-04		
Total	7.01	19			

tratamientos	Medias	n	E.E.
Vertisol	3.92	4	0.01 A
Molisol	3.66	4	0.01 B
Oxisol	3.51	4	0.01 C
Entisol	3.38	4	0.01 D
Inceptisol	2.21	4	0.01 E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 6. Análisis de la varianza Calcio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	78.03	4	19.51	0.64	0.6422
tratamiento	78.03	4	19.51	0.64	0.6422
Error	426.32	14	30.45		
Total	504.35	18			

tratamiento	Medias	n	E.E.
molisol	17.63	4	2.76 A
oxisol	14.93	4	2.76 A
inceptisol	14.66	3	3.19 A
vertisol	12.53	4	2.76 A
entisol	12.10	4	2.76 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 7. Análisis de la varianza de Magnesio de cambio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.22	4	0.55	2.71	0.0735
tratamiento	2.22	4	0.55	2.71	0.0735
Error	2.87	14	0.20		
Total	5.09	18			

tratamiento	Medias	n	E.E.	.
inceptisol	1.78	3	0.26	A
entisol	1.75	4	0.23	A
vertisol	1.47	4	0.23	A
molisol	1.30	4	0.23	A
oxisol	0.85	4	0.23	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 8. Análisis de la varianza de Potasio.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1.43	4	0.36	10.37	0.0004
tratamiento	1.43	4	0.36	10.37	0.0004
Error	0.48	14	0.03		
Total	1.91	18			

tratamiento	Medias	n	E.E
molisol	1.07	4	0.09 A
oxisol	0.50	4	0.09 B
vertisol	0.41	4	0.09 B
entisol	0.40	4	0.09 B
inceptisol	0.31	3	0.11 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 9. Análisis de la varianza Sodio.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.47	4	0.12	4.38	0.0167
tratamiento	0.47	4	0.12	4.38	0.0167
Error	0.37	14	0.03		
Total	0.84	18			

tratamiento	Medias	n	E.E
inceptisol	0.51	3	0.09 A
entisol	0.11	4	0.08 B
molisol	0.10	4	0.08 B
vertisol	0.10	4	0.08 B
oxisol	0.04	4	0.08 B B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 10. Análisis de la varianza CIC.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	30.53	4	7.63	6.11	0.0046
tratamiento	30.53	4	7.63	6.11	0.0046
Error	17.50	14	1.25		
Total	48.02	18			

tratamiento	Medias	n	E.E.
molisol	9.61	4	0.56 A
entisol	9.01	4	0.56 A
inceptisol	8.32	3	0.65 AB
vertisol	7.70	4	0.56 AB
oxisol	6.02	4	0.56 B B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)