



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica L.*) en la etapa de almácigo

Siavosh Sadeghian Khalajabadi

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Doctorado en Ciencias Agropecuarias – Área Agraria
Medellín, Colombia

2012

Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica L.*) en la etapa de almácigo

Siavosh Sadeghian Khalajabadi

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ciencias Agrarias

Director: Raúl Darío Zapata Hernández, Ph. D.

Línea de investigación: Fisiología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Doctorado en Ciencias Agropecuarias – Área Agraria
Medellín, Colombia

2012

Dedico este trabajo, como una pequeña muestra de gratitud,
a la memoria de mi hermano Dariush

Agradecimientos

A Clarita, mi esposa, y a Hesam Camilo, mi hijo, por estar junto a mí en todos los momentos de la vida, y también por tenerme paciencia.

A la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por su participación en mi formación académica.

Al Centro Nacional de Investigaciones del Café–Cenicafé, por el apoyo logístico brindado.

Al doctor Raúl Darío Zapata Hernández, docente de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por su acertada orientación, oportunas enseñanzas, valiosos consejos y amistad incondicional.

Al doctor Gabriel Cadena Gómez, Director de Cenicafé hasta el año 2009, y al doctor Fernando Gast Harders, actual Director de Cenicafé, por su colaboración.

A la doctora Esther Cecilia Montoya, Coordinadora de la Disciplina de Biometría de Cenicafé, por su valiosa asesoría.

A los doctores Idupulapati M. Rao, Nelson Walter Osorio Vega y Leila Ampar Rojas Escobar por sus oportunos y pertinentes aportes.

A la señora Beatríz Mejía, Analista del laboratorio de la Disciplina de Suelos de Cenicafé, por su colaboración en las diferentes fases del trabajo.

Al ingeniero Hernán González Osorio, Investigador de la Disciplina de Suelos de Cenicafé, por su colaboración incondicional.

Al doctor Edgar Hincapié Gómez, Investigador de la Disciplina de Suelos de Cenicafé, por apoyo prestado en las determinaciones analíticas.

A los doctores Enrique Martínez Bustamante y José Miguél Cotes, docentes de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por compartir sus conocimientos y la asesoría brindada.

A la señora Lucero Arias, a Lady Juliet Vargas y Diego Arcila, funcionarios y colaboradores de la Disciplina de Suelos de Cenicafé, por su apoyo.

A todos los jefes de las Subestaciones de Cenicafé, por su ayuda en los aspectos logísticos de la investigación.

Resumen

La disponibilidad de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) para las plantas, no solo depende de su contenido en el complejo de cambio y en la solución, sino también de la competencia que se puede presentar entre estos elementos; comportamiento que varía de acuerdo a la selectividad catiónica de los suelos. Este trabajo permitió generar información acerca de la selectividad catiónica de algunos suelos por estos elementos en la zona cafetera colombiana, y el efecto de los cambios en sus relaciones sobre la nutrición y el crecimiento del café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almácigo.

En una primera fase se evaluaron las reacciones de intercambio Ca–Mg–K en 14 unidades de suelos, diferentes en su origen y mineralogía. Para ello se aplicaron cuatro soluciones con diferentes fuerzas iónicas (1, 2, 4 y 8 mmol L⁻¹) y concentraciones (0,25, 0,50, 1,00 y 2,00 mmol_c L⁻¹), manteniendo una relación molecular entre los cationes igual a 1,0. Los coeficientes de selectividad de intercambio para los tres pares de cationes, Ca–Mg, Ca–K y K–Mg, fueron calculados mediante la ecuación de Vanselow, utilizando los valores de actividad de los iones en la solución de equilibrio y concentraciones de los cationes intercambiables.

En todas las unidades cartográficas de suelos evaluadas, los sitios de intercambio catiónico presentaron mayor afinidad por el Ca²⁺, seguido por Mg²⁺ y K⁺. El comportamiento de la selectividad para los tres elementos varió entre los suelos, pero sólo en algunos casos se encontró relación de la selectividad con la mineralogía o el origen de estos. Se presentó una fuerte preferencia por el Ca²⁺ antes que el Mg²⁺, y pese a que ésta disminuyó con el incremento de la fuerza iónica, no dejó de manifestarse; además, el aumento en el pH de los suelos se reflejó en una reducción de la selectividad por el Ca²⁺ con respecto al Mg²⁺. En ocho de los suelos hubo preferencia de K⁺ sobre Ca²⁺, y todos fueron más selectivos por el K⁺ que por el Mg²⁺. En general los Andisoles presentaron menores cambios en su selectividad con los incrementos de la fuerza iónica.

Con base en los resultados de la primera fase del trabajo, se seleccionaron tres de los 14 suelos (unidades cartográficas Timbío, Chinchiná y Doscientos), para determinar en ellos el efecto de las variaciones de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre la nutrición y el crecimiento de café variedad Caturra. Bajo el diseño de bloques completos al azar se evaluaron tres dosis de cada elemento (0, 1 y 3 g dm⁻³ de suelo), en una combinación factorial 3³ con 10 repeticiones, empleando como fuentes de fertilizantes sulfatos.

Se encontró una estrecha relación entre la actividad de Mg²⁺ y K⁺ y su contenido intercambiable, tendencia que no se halló para el Ca²⁺, como consecuencia de la menor solubilidad de la fuente empleada. La actividad de los tres elementos se reflejó en la concentración de estos en la planta, en tanto que la fase intercambiable sólo fue buen indicador para Mg²⁺ y K⁺. En ninguna de las tres unidades de suelos, los cambios en las relaciones Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K en la fase intercambiable lograron explicar las variaciones del peso seco total de las plantas. En contraste,

X Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables ...

para dos de las unidades de suelos se encontró efecto de las relaciones de actividades Ca/Mg y Ca/K sobre la biomasa de las plantas. Las variaciones de las concentraciones de Ca, Mg y K en las plantas pudieron ser explicadas por sus relaciones, sin que esto indicara necesariamente condiciones de competencia.

Palabras clave: selectividad catiónica, fuerza iónica, parámetros termodinámicos, stress por salinidad, competencia, concentración de nutrientes.

Abstract

The availability of calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}) and potassium (K^+) for plants depends not only on the content of these elements in the exchangeable complex and the solution, but also in the competition that can take place among them; this behavior varies accordingly to the cation selectivity of the soil. This study allowed to obtain information regarding the cation selectivity of some soils of the mentioned elements in the Colombian coffee zone, and the effect of changes in its relationships on coffee seeding nutrition and growth (*Coffea Arabica L.*) at the nursery stage.

On a primary phase, the reactions of Ca^{2+} - Mg^{2+} - K^+ exchange in 14 soils with differences in their origin and mineralogy were evaluated. For this, four solutions were applied with different ionic strength (1, 2, 4 and 8 mmol L^{-1}) and concentrations (0.25, 0.50, 1.00 and 2.00 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$), maintaining a molecular relation among the cations equal to 1.0. The exchange selectivity coefficients for the three cation pairs, Ca^{2+} - Mg^{2+} , Ca^{2+} - K^+ , and K^+ - Mg^{2+} were calculated with the Vanselow equation, using the ion activity in the solution equilibria and the concentration of the exchangeable cations.

In all the evaluated units of soils, the cation exchangeable sites presented higher affinity for Ca^{2+} , followed by Mg^{2+} and K^+ . The behavior of the selectivity for the three elements varied between the soils, but only in some cases it was possible to relate this with the soil mineralogy or their origin. There was a strong preference for Ca^{2+} over Mg^{2+} ; even though the Ca^{2+} was diminished with the increase of the ionic strength, it did not cease to manifest itself. Furthermore, the increase in soil pH level produced a reduction of the Ca^{2+} selectivity regarding the Mg^{2+} . In eight of the soils there was a preference of K^+ over Ca^{2+} , and all were more selective for K^+ than Mg^{2+} . In general, the Andisols presented minor changes in their selectivity with the increase of ionic strength.

In a second phase, three of 14 soils were selected (Timbío, Chinchiná and Doscientos) to determine the effect of Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ variations in the exchangeable phase and in the soil solution on nutrition and growth of the coffee seedlings. Under the design random blocks, three doses of each element were evaluated (0, 1 and 3 g dm^{-3} of soil), in a factorial combination 3^3 with 10 repetitions, applying sulfate fertilizers as sources.

As a result treatments, the contents and ratios of Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ in the soils were modified, nevertheless, due to the high doses applied soil salinity was generated, affecting plant growth. High residuality of the applied elements was detected, which generated an over evaluation of exchangeable fractions of Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ (normal and neutral ammonium acetate). A close relationship was found between the activity and exchangeable content of Mg^{2+} and K^+ ; tendency not found for Ca^{2+} , as a consequence of the lower solubility of the source used. In soil solution the activity of these elements was reflected in their concentration in the plant, while the exchangeable phase was only a good indicator for Mg^{2+} and K^+ . In none of the three soils, the changes in the ratios of Ca/Mg, Ca/K, Mg/K and (Ca+Mg)/K in the exchangeable phase allowed to explain the variations of the plants' total dry weight. In contrast, an effect of the ratios of Ca/Mg and Ca/K

activities in soil solution for two of the soils was found on the biomass of the plants. The concentration variations of Ca, Mg and K^+ in plants tissues were explained by its ratios, without this necessarily indicating competence conditions.

Key words: cation selectivity, ionic strength, thermodynamic parameters, salinity stress, competition, nutrient absorption.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XVII
Lista de tablas	XXI
Introducción	1
1. Marco teórico y estado del arte	3
1.1 Calcio, magnesio y potasio en la planta	3
1.1.1 Calcio	3
1.1.2 Magnesio	5
1.1.3 Potasio	6
1.2 Calcio, magnesio y potasio en el suelo	97
1.2.1 Calcio	7
1.2.2 Magnesio	8
1.2.3 Potasio	9
1.3 El intercambio catiónico y su relación con la disponibilidad de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺	10
1.3.1 Generalidades	10
1.3.2 Selectividad catiónica	10
1.4 Efecto de las aplicaciones de Ca, Mg y K sobre sus contenidos en el suelo	14
1.5 Efecto de las variaciones de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en cultivos	15
1.5.1 Generalidades	15
1.5.2 Efecto de las relaciones de Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y K ⁺ en diversos cultivos	17
1.5.3 Efecto de las relaciones de Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y K ⁺ en el cultivo del café	20
1.6 Las relaciones entre Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y K ⁺ como indicadores de su disponibilidad .	22
1.6.1 Generalidades	22
1.6.2 Niveles y relaciones adecuados de Ca, Mg y K propuestos para café	24
2. Materiales y métodos	25
2.1 Localización y duración	25

2.2	Metodología	25
2.2.1	Fase I. Selectividad por Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} intercambiables en algunas unidades de suelos de la zona cafetera colombiana	25
2.2.1.1	Selección de las unidades cartográficas de suelo	25
2.2.1.2	Toma y análisis de las muestras de suelo	25
2.2.1.3	Definición de los tratamientos y procedimiento analítico	26
2.2.1.4	Manejo de la información y análisis estadístico	28
2.2.1.5	Variable de respuesta	28
2.2.1.6	Análisis estadístico	28
2.2.2	Fase II. Efecto de las variaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre la nutrición y el crecimiento de café	29
2.2.2.1	Tratamientos y diseño experimental	29
2.2.2.2	Evaluación de los parámetros biológicos	30
2.2.2.3	Evaluación de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la solución del suelo... ..	31
2.2.2.4	Evaluación de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la fase intercambiable del suelo	31
2.2.2.5	Variable de respuesta	31
2.2.2.6	Variables complementarias	31
2.2.2.7	Análisis estadístico de los resultados	32
3.	Resultados y discusión	33
3.1	Fase I. Selectividad por Ca, Mg y K intercambiables en algunas unidades de suelos de la zona cafetera colombiana	33
3.1.1	Propiedades de los suelos	33
3.1.2	Efecto de las soluciones de intercambio	40
3.1.3	Coeficientes de selectividad para el intercambio catiónico Ca–Mg	52
3.1.4	Coeficientes de selectividad para el intercambio catiónico K–Ca	59
3.1.5	Coeficientes de selectividad para el intercambio catiónico K–Mg	63
3.1.6	Parámetros termodinámicos para los intercambios estudiados	68
3.1.7	Selección de suelos para la fase II	70
3.2	Fase II. Efecto de las variaciones de Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+} en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre la nutrición y el crecimiento de café	71
3.2.1	Cambios químicos generados en el suelo por el efecto de los tratamientos	72

3.2.1.1 Aspectos generales	73
3.2.1.2 Efecto de los tratamientos en los coeficientes de selectividad	82
3.2.1.3 Relaciones entre cationes intercambiables	83
3.2.2 Cambios químicos generados en la solución del suelo en respuesta a los tratamientos	88
3.2.3 Crecimiento de café en la etapa de almácigo en respuesta al suministro de Ca, Mg y K	97
3.2.3.1 Unidad Chinchiná	98
3.2.3.2 Unidad Timbío	103
3.2.3.3 Unidad Doscientos	106
3.2.4 Absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} por las plantas de café en respuesta a los tratamientos	110
3.2.5 Efecto de los contenidos y relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre el crecimiento de café y la toma de estos nutrientes	116
3.2.5.1 Crecimiento de las plantas en respuesta a los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} intercambiable y en la solución del suelo	116
3.2.5.2 Concentración de Ca, Mg y K en la planta de café en respuesta a sus contenidos en la fase intercambiable y en la solución del suelo	120
3.2.5.3 Crecimiento de las plantas en respuesta a las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} y sus porcentajes de saturación	124
3.2.5.4 Concentración de Ca, Mg y K en la planta de café en respuesta a las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la fase intercambiable y en la solución del suelo	131
4. Conclusiones	137
A. Anexo: Foto microlímetro	139
B. Anexo: Mineralogía de los suelos	141
C. Anexo: Análisis de varianza	143
Bibliografía	148

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1. Relación entre pH y los cationes de cambio en las unidades de suelos evaluadas	36
Figura 3-2. Variaciones de CIC con relación a los contenidos del carbono orgánico en los suelos evaluados	37
Figura 3-3. Cambios de CICE en función del carbono orgánico y CIC	38
Figura 3-4. Relación entre el contenido de arcilla y CICE en los suelos evaluados	39
Figura 3-5. Relación entre el contenido de arcilla y CIC en los suelos evaluados	39
Figura 3-6. Relación entre los valores iniciales de la suma de bases y los valores finales en todas las unidades cartográficas evaluadas	44
Figura 3-7. Valores del pH obtenidos en la evaluación inicial del suelo y en la solución de equilibrio	44
Figura 3-8. Relación entre los valores iniciales de la suma de bases y los valores finales en 12 de las unidades cartográficas evaluadas	45
Figura 3-9. Actividad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en función de su concentración en la solución de equilibrio	51
Figura 3-10. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio Ca-Mg en función de la fracción equivalente de Ca^{2+}	55
Figura 3-11. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio Ca-Mg en función del pH de la solución de equilibrio	55
Figura 3-12. Pendientes de los modelos de regresión lineal para K_v Ca-Mg en función la concentración de cationes en las soluciones de intercambio	58
Figura 3-13. Agrupación de suelos por su similitud en los cambios de K_v Ca-Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio ...	59
Figura 3-14. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Ca en función de la fracción equivalente de K^{+}	60
Figura 3-15. Variaciones del coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Ca en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio para tres de las unidades de suelos	62
Figura 3-16. Correlación entre los coeficientes de selectividad de Vanselow para los intercambios K-Ca y K-Mg	63

Figura 3-17. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Mg en función de la fracción equivalente de K^+	64
Figura 3-18. Pendientes de los modelos de regresión lineal para K_v K-Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio	66
Figura 3-19. Agrupación de suelos por su similitud en los cambios de los coeficientes de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio	67
Figura 3-20. Variaciones del coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio para las unidades de suelos Salgar y Guadalupe .	67
Figura 3-21. Conductividad eléctrica del suelo en respuesta a las dosis de Ca, Mg y K ...	78
Figura 3-22. Conductividad eléctrica y concentración de sulfatos en función de mesoporos	79
Figura 3-23. Variaciones de CICE en respuesta a las dosis de Ca, Mg y K	79
Figura 3-24. Variaciones promedio en los contenido de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables, en respuesta a su aplicación. El ajuste corresponde a los valores promedio	82
Figura 3-25. Variaciones en las relaciones de Ca/Mg, como respuesta al suministro de calcio y magnesio	83
Figura 3-26. Variaciones en las relaciones de Ca/K, como respuesta al suministro de calcio y potasio	84
Figura 3-27. Variaciones en las relaciones de Mg/K, como respuesta al suministro de magnesio y potasio	86
Figura 3-28. Variaciones en las relaciones de (Ca+Mg)/K intercambiables, como respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio	87
Figura 3-29. Concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo en respuesta a las dosis aplicadas	90
Figura 3-30. Valores promedio de las concentraciones de cationes y aniones en la solución del suelo	91
Figura 3-31. Relación entre la suma de cationes y aniones en la solución del suelo	92
Figura 3-32. Relación entre la concentración y la actividad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo	92
Figura 3-33. Actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo en función de las dosis aplicadas	93
Figura 3-34. Relación entre las actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo y su contenido en la fase intercambiable	94
Figura 3-35. Actividad de Ca^{2+} en respuesta a la suma de Mg^{2+} y K^+ intercambiables	95

Figura 3–36. Actividad de calcio en función de la concentración total de aniones en la solución del suelo	95
Figura 3–37. Relación entre las actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}	96
Figura 3–38. Relación entre la conductividad eléctrica del suelo y la registrada en la solución del suelo	97
Figura 3–39. Proporción relativa del peso de hojas, tallos y raíces en las tres unidades de suelo	98
Figura 3–40. Peso seco total de las plantas para el tratamiento testigo en función del pH y aluminio intercambiable	98
Figura 3–41. Peso total de las plantas en la unidad Chinchiná en respuesta a las dosis de calcio	99
Figura 3–42. Peso total de las plantas en la unidad Chinchiná en respuesta a magnesio en combinación con potasio	99
Figura 3–43. Peso seco de raíces y tallos de las plantas en la unidad Chinchiná en respuesta a magnesio en combinación con potasio	99
Figura 3–44. Peso seco de hojas en la unidad Chinchiná en respuesta a las dosis de calcio	103
Figura 3–45. Relación entre el peso seco de las raíces y el de los tallos, las hojas y el peso total de las plantas en la unidad Chinchiná	103
Figura 3–46. Síntomas de toxicidad por salinidad, causada por las dosis más altas de magnesio y potasio, en las unidades Chinchiná y Doscientos, cinco días después del transplante	104
Figura 3–47. Peso total de las plantas en la unidad Timbío en respuesta a magnesio en combinación con calcio	104
Figura 3–48. Peso total de las plantas en la unidad Timbío en respuesta a magnesio en combinación con potasio	104
Figura 3–49. Peso total de las plantas en la unidad Timbío en respuesta a calcio en combinación con potasio	104
Figura 3–50. Relación entre el peso seco de las raíces y el de los tallos, las hojas y el peso total de las plantas en la unidad Timbío	105
Figura 3–51. Peso total de las plantas en la unidad Doscientos en respuesta a magnesio en combinación con calcio	106
Figura 3–52. Peso total de las plantas en la unidad Doscientos en respuesta a magnesio en combinación con potasio	106
Figura 3–53. Relación entre el peso seco de las raíces y el de los tallos, las hojas y el peso total de las plantas en la unidad Doscientos	107
Figura 3–54. Peso seco promedio de las plantas por unidad de suelo	107

Figura 3-55. Promedio del peso seco total de las plantas en función del pH y conductividad eléctrica	107
Figura 3-56. Conductividad eléctrica del suelo en respuesta a la suma de Mg^{2+} y K^+ intercambiable del suelo	108
Figura 3-57. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a la conductividad eléctrica del suelo	109
Figura 3-58. Rendimiento relativo en función de la conductividad eléctrica	109
Figura 3-59. Concentración de Ca, Mg y K las raíces, tallos y hojas de café en respuesta a su aplicación en la unidad Chinchiná	114
Figura 3-60. Concentración de Ca, Mg y K las raíces, tallos y hojas de café en respuesta a su aplicación en la unidad Timbío	114
Figura 3-61. Concentración de Ca, Mg y K las raíces, tallos y hojas de café en respuesta a su aplicación en la unidad Doscientos	115
Figura 3-62. Peso total de las plantas de café en respuesta al contenido de Ca^{2+} intercambiable y actividad de Ca^{2+} en la solución del suelo	117
Figura 3-63. Peso total de las plantas de café en respuesta al contenido de Mg^{2+} intercambiable y actividad de Mg^{2+} en la solución del	118
Figura 3-64. Peso total de las plantas de café en respuesta al contenido de K^+ intercambiable y actividad de K^+ en la solución del suelo	119
Figura 3-65. Peso seco total de las plantas de café en respuesta al contenido de Mg^{2+} y K^+ intercambiables	119
Figura 3-66. Concentración de Ca en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los contenidos de Ca^{2+} intercambiable y actividad de Ca^{2+} en la solución	120
Figura 3-67. Concentración de Mg en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los contenidos de Mg^{2+} intercambiable y actividad de Mg^{2+} en la solución	121
Figura 3-68. Concentración de K en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los contenidos de K^+ intercambiable y actividad de K^+ en la solución	122
Figura 3-69. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a las relaciones Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y Ca+Mg/K en la fase intercambiables	125
Figura 3-70. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a los porcentajes de saturación de las bases intercambiables	127
Figura 3-71. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a las relaciones de actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo	129
Figura 3-72. Peso seco total de las plantas de café en función de las relaciones Mg/K en la fase intercambiable y en la solución, agrupadas por las dosis de K	130
Figura 3-73. Concentración de Ca en raíces de café para la unidad Doscientos, en función de Mg y la relación Ca/Mg en la fase intercambiable y su actividad en solución	131
Figura 3-74. Concentración de Ca en las raíces, tallos y hojas de café en respuesta a la suma de los contenidos de Mg^{2+} y K^+ intercambiables en la unidad Doscientos	132

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1–1. Estimativo conceptual de las bases en el suelo, según el ICA	23
Tabla 1–2. Clasificación general de relaciones ideales entre las bases intercambiables..	23
Tabla 2–1. Información general sobre las unidades cartográficas del suelo preseleccionadas para la primera fase del estudio y su ubicación	26
Tabla 2–2. Composición de las soluciones de intercambio, aplicados como tratamientos	27
Tabla 3–1. Propiedades químicas y físicas de los suelos utilizados en el estudio	34
Tabla 3–2. Valores de CIC, CICE, relaciones entre cationes intercambiables y porcentaje de saturación de cationes con respecto a la CIC	35
Tabla 3–3. Valores promedio y desviación estándar de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables y la suma de éstas bases en respuesta a los tratamientos de soluciones de intercambio con igual proporción de Ca, Mg y K	41
Tabla 3–4. Valores promedio de las relaciones entre cationes intercambiables en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio	45
Tabla 3–5. Valores promedio y desviación estándar de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y la suma de bases en la solución de equilibrio, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio	47
Tabla 3–6. Valores promedio y desviación estándar de actividad de los cationes en la solución de equilibrio, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio	49
Tabla 3–7. Valores promedio de coeficientes de selectividad de Vanselow para los intercambios catiónicos Ca–Mg, K–Ca y K–Mg, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio	53
Tabla 3–8. Valores promedio del pH y desviación estándar, correspondientes a los tratamientos de intercambio en las unidades de suelos evaluadas	56
Tabla 3–9. Ecuaciones de regresión correspondientes al coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio Ca–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para las unidades de suelo	57
Tabla 3–10. Nuevos modelos de regresión para el coeficiente de selectividad Ca–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para 13 las unidades de suelo	58
Tabla 3–11. Ecuaciones de regresión correspondientes al coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K–Mg en función de la concentración de	65

	cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para las unidades de suelo	
Tabla 3-12.	Nuevos modelos de regresión para K_v K-Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para nueve unidades de suelo	66
Tabla 3-13.	Parámetros termodinámicos de equilibrio para los intercambios Ca-Mg, K-Ca y K-Mg.	69
Tabla 3-14.	Valores promedio de los coeficientes de selectividad de Vanselow para los intercambios catiónicos estudiados, presentados en forma ascendente	70
Tabla 3-15.	Propiedades químicas y físicas de los suelos utilizados en la segunda fase de estudio el estudio	72
Tabla 3-16.	Valores promedio de la conductividad eléctrica, la acidez y los contenidos de los cationes intercambiables en la unidad Chinchiná en respuesta a los tratamientos	74
Tabla 3-17.	Valores promedio de la conductividad eléctrica, la acidez y los contenidos de los cationes intercambiables en la unidad Timbío en respuesta a los tratamientos	75
Tabla 3-18.	Valores promedio de la conductividad eléctrica, la acidez, y los contenidos de los cationes intercambiables en la unidad Doscientos en respuesta a los tratamientos	76
Tabla 3-19.	Modelos lineales que expresan los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ extraídos en función de los centimoles de carga/kg aplicados	81
Tabla 3-20.	Valores promedio de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución de los suelos en respuesta a los tratamientos	89
Tabla 3-21.	Promedios del peso seco total de las plantas y peso seco de raíces, tallos y hojas, en respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio en la unidad Chinchiná	100
Tabla 3-22.	Promedios del peso seco total de las plantas y peso seco de raíces, tallos y hojas, en respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio en la unidad Timbío	101
Tabla 3-23.	Promedios del peso seco total de las plantas y peso seco de raíces, tallos y hojas, en respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio en la unidad Doscientos	102
Tabla 3-24.	Valores promedio de la concentración de Ca, Mg y K de raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los tratamientos en la unidad Chinchiná	111
Tabla 3-25.	Valores promedio de la concentración de Ca, Mg y K de raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los tratamientos en la unidad Timbío	112
Tabla 3-26.	Valores promedio de la concentración de Ca, Mg y K de raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los tratamientos en la unidad Doscientos	113

Tabla 3–27.	Modelos lineales para explicar las variaciones de la concentración porcentual de Ca, Mg y K en raíces, tallos y hojas en función de sus contenidos en la fase intercambiable y en la solución, obtenidos para las unidades de suelos evaluadas	123
Tabla 3–28.	Modelos que explican para el suelo de la unidad Doscientos las variaciones de la concentración de Ca, Mg y K en las diferentes partes de la planta en función de sus contenidos y relaciones en el suelo	133
Tabla 3–29.	Modelos que explican para el suelo de la unidad Chinchiná las variaciones de la concentración de Ca, Mg y K en las diferentes partes de la planta en función de sus contenidos y relaciones en el suelo	134
Tabla 3–30.	Modelos que explican para el suelo de la unidad Timbío las variaciones de la concentración de Ca, Mg y K en las diferentes partes de la planta en función de sus contenidos y relaciones en el suelo	135

Introducción

La aplicación de fertilizantes involucra diferentes aspectos que se relacionan tanto con la especie o el genotipo a tratar, como con las condiciones climáticas, edáficas y el manejo que se da a las plantaciones. En cuanto a los factores del suelo se refiere, tiene gran importancia la disponibilidad de los nutrientes para el cultivo en cada una de las etapas de su desarrollo; la cual está dada por el contenido de los nutrientes y las interacciones que se pueden presentar entre estos (antagonismos y sinergismos), tanto en la fase sólida como en la solución del suelo; medio de donde las raíces de las plantas los toman para su crecimiento. Entre los elementos esenciales están el calcio (Ca^{2+}), el magnesio (Mg^{2+}) y el potasio (K^+); cationes que se encuentran adheridas a las cargas negativas de los coloides órgano-minerales del suelo, y a los que conocen como bases intercambiables. Los requerimientos de estos nutrientes varían de acuerdo a la especie, la etapa de crecimiento y la producción, dentro de ciertas condiciones medioambientales. Aunque las cantidades de Ca^{2+} presentes en el suelo son mayores a las del Mg^{2+} , y las cantidades de este a su vez son superiores a las del K^+ , la mayoría de las especies vegetales absorben y requieren más K^+ que Ca^{2+} y Mg^{2+} .

En café, al igual que la mayoría de las especies, la demanda de estos cationes se incrementa conforme aumenta la edad de las plantas, presentando siempre el siguiente orden: $\text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$. Por lo tanto, se sugiere incluirlos en los planes de fertilización, siempre y cuando sus niveles en el suelo sean bajos; pese a lo anterior, rara vez se observan síntomas de deficiencia de Ca.

Diversos autores sostienen que la disponibilidad de estos tres elementos en el suelo, además de sus contenidos en la fase intercambiable, está determinada por la proporción relativa de estos, es decir su cantidad frente a los demás cationes y/o con respecto a la capacidad del suelo para retenerlos en términos de CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico, determinado analíticamente mediante la extracción con acetato de amonio 1N a pH=7,0) o CICE (Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva, determinado por la suma de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} y H^+); planteamiento que tiene como soporte la competencia que estos ejercen entre sí en el complejo de cambio o por los sitios activos de absorción de las raíces de las plantas. Basado en lo anterior se han propuesto relaciones ideales entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , tanto a nivel general como para algunas especies en particular. Cabe resaltar que en la práctica dichas relaciones son difíciles de lograr; además, los suelos difieren en su selectividad para retener estos cationes debido a las propiedades mineralógicas, químicas y físicas que los caracterizan.

En café, los resultados de las investigaciones desarrolladas en los diferentes países productores del grano suelen ser divergentes. Bertsch et al. (1991) las consideran irrelevantes a la hora de recomendar un plan de fertilización, Valencia (1999) sugiere una proporción ideal entre estos, Carvajal (1984) y Coffee Research Foundation (1990) solo tienen en cuenta la relación de $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ para ajustar la fertilización potásica, Palma (1994) y Carrillo (1990) se basan en el valor del cociente Mg/K para la recomendación de Mg, Henao et al. (1995) consideran a la relación de la actividad $\frac{\sqrt{a\text{Mg}}}{[a\text{K} + \sqrt{(a\text{Mg} + a\text{Ca})}]}$ o el porcentaje de la saturación de Mg con respecto de la CIC como los mejores índices para determinar la disponibilidad de Mg; por último, Cadena (2004) sugiere una proporción entre estos en el momento de dar la recomendación de la fertilización.

Pese a los esfuerzos realizados en Colombia y otros países productores, hoy día se desconoce el efecto de los cambios en las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo, sobre la toma de estos elementos por la planta de café y su crecimiento. Por lo anterior, no se dispone de información suficiente que permita recomendar prácticas de fertilización tendientes a un manejo apropiado de estas relaciones, teniendo en cuenta las propiedades de los suelos dedicados al café en el país.

Mediante el desarrollo de esta investigación se buscó aportar conocimientos básicos que contribuyan a resolver el problema relacionado con el efecto de las interacciones entre el Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo, sobre la toma de estos elementos por la planta de café y su crecimiento. Para lo anterior se escogió la etapa de almácigo, en la cual es mucho más factible modificar dichas relaciones, dado que los fertilizantes se pueden incorporar al suelo de una manera homogénea. Los objetivos propuestos para cumplir con la meta trazada fueron:

Objetivo general:

Avanzar en el conocimiento de la selectividad catiónica en suelos de la zona cafetera colombiana y su relación con la nutrición y el crecimiento de café en la etapa de almácigo.

Objetivos específicos:

- Determinar la selectividad por el Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en algunas unidades de suelos de la zona cafetera colombiana contrastantes en su origen y mineralogía.
- Evaluar el efecto de los cambios en los contenidos y en las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre la nutrición y el crecimiento de café en la etapa de almácigo.

Hipótesis de investigación:

- Para al menos una de las relaciones de intercambio Ca–Mg, K–Ca y K–Mg, el coeficiente de selectividad depende de la interacción unidad de suelo y concentración iónica de estos elementos en la solución del suelo.
- Los cambios en las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo, afectan la nutrición y el crecimiento de café en la etapa de almácigo.

1. Marco teórico y estado del arte

1.1 Calcio, magnesio y potasio en la planta

Entre los 16 nutrimentos esenciales que las plantas requieren para su normal crecimiento y desarrollo se encuentran el K, Ca y Mg. Estos tres, de acuerdo con su demanda por los cultivos son considerados macronutrientes o elementos mayores (Havlin et al., 1999; Mengel y Kirkby, 2000; Navarro y Navarro, 2003); siendo más alto el requerimiento del K, razón por la cual algunos autores lo clasifican como “*primario*”, y a los otros dos como “*secundarios*” (Guerrero, 2001, Estrada, 1990). Con relación a este último aspecto, Soil Improvement Committee California Plant Health Association (2004) sostiene que la anterior clasificación, antes de tener su origen en la cantidad relativa requerida, se relaciona con la mayor frecuencia de observar las deficiencias de los nutrientes primarios.

Mengel y Kirkby (1987), basándose en el comportamiento bioquímico y las funciones fisiológicas, clasifican a estos tres nutrientes dentro de un mismo grupo, pues estos ejercen tanto funciones celulares iónicas no específicas (establecer potenciales osmóticos en los órganos de las células o mantener el equilibrio iónico), como específicas. Entre estas funciones, los anteriores autores mencionan:

- K^+ y Ca^{2+} : mecanismos de control de desencadenamiento, mediante la regulación de potenciales osmóticos, la permeabilidad de las membranas, los electropotenciales y las conductancias.
- Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ : influencia estructural, la cual resulta al unir moléculas orgánicas (particularmente enzimas), alterando así su conformación.
- Ca^{2+} y Mg^{2+} : formación de ácidos Lewis, pues estos iones son capaces de aceptar un par de electrones y catalizar o polarizar grupos reactivos.

1.1.1 Calcio

Las raíces de las plantas toman el calcio desde la solución del suelo en forma iónica Ca^{2+} (Larcher, 2003; Mengel y Kirkby, 2000, Soil Improvement Committee California Plant Health Association, 2004; Marschner, 1986). El Ca es el nutriente de carácter básico más abundante en las plantas después de K (Navarro y Navarro, 2003). De acuerdo con la revisión hecha por Larcher (2003), la concentración de Ca en la masa seca de las especies cultivadas varía entre 0,04 y 1,3%.

El Ca es un nutriente de naturaleza estructural, pues hace parte del componente de las paredes y membranas celulares, razón por la cual es indispensable su presencia para la formación de nuevas células. Se cree que este elemento contrarresta los efectos tóxicos del ácido oxálico al formar oxalato de Ca en las vacuolas (Soil Improvement Committee California Plant Health Association, 2004). Larcher (2003) menciona las siguientes funciones de Ca en la planta: regulación de la hidratación (antagonistas K y Mg); activador de enzimas (Amilasa, ATPasa); regulación de la elongación y crecimiento. Marschner (1986) resalta el hecho que a diferencia de los otros macronutrientes, una alta proporción de Ca total en el tejido de las plantas se localiza en las paredes celulares (apoplasto), razón por la cual su presencia es vital en la estabilización de estas y de las membranas; además de otras funciones como la modulación de las enzimas, la osmoregulación y el balance de catión-anión.

En los tejidos vegetales el Ca puede encontrarse en forma libre (Ca^{2+}) o adsorbido a iones no difusibles como grupos carboxílicos, fosfóricos e hidroxifenólicos; así mismo puede ocurrir en forma de oxalatos, carbonatos y fosfatos de Ca; compuestos que se encuentran con frecuencia en las vacuolas (Mengel y Kirkby, 2000).

El Ca se caracteriza por una muy baja habilidad de transporte dentro de la planta, pues una vez que se deposita en los tejidos vegetales será muy difícil removerlo. Es por ello que son los tejidos jóvenes los primeros en ser afectados cuando existen deficiencias de este nutriente (Navarro y Navarro, 2003; Soil Improvement Committee California Plant Health Association, 2004).

Mengel y Kirkby (1987) citan los trabajos de Clarkson y colaboradores para indicar que la absorción de Ca^{2+} , en contraposición a otros nutrientes como el K^+ y fósforo (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) está restringida a la zona colindante con el ápice de la raíz, diferencia en el comportamiento que ha sido explicada por el desarrollo de la banda de Caspary; pues el envejecimiento de este órgano conlleva a una suberización de la endodermis, la cual impide el movimiento radical del Ca. En este sentido, la translocación de Ca^{2+} desde la corteza al tallo se limita a la ruta apoplástica o del espacio libre, vía que solamente es accesible en las raíces jóvenes no suberizadas. Lo anterior, además de indicar que la absorción de Ca^{2+} se da de manera pasiva, apoya el hecho que su ascenso en la savia del xilema ocurre con la corriente transpiratoria; fenómeno que tiene lugar básicamente durante el día, y es por ello que la absorción de Ca^{2+} se detiene en la noche.

La carencia de Ca^{2+} reduce la tasa de crecimiento en las plantas, especialmente en los tejidos meristemáticos, tanto de raíces como parte aérea, dado que el Ca es requerido para la elongación y la división celular. Los síntomas de su deficiencia comienzan a manifestarse en las hojas jóvenes, las cuales se deforman y se vuelven cloróticas (Mengel y Kirkby, 2000). Soil Improvement Committee California Plant Health Association (2004), además de los anteriores cita los siguientes síntomas: coloración verde anormal en el follaje, caída prematura de flores y frutos, tallos debilitados, “quemadura apical” de las hojas jóvenes (en especies como el apio y lechuga), y zonas acuosas y sin color en frutos (común en el tomate, pimentón, melón, manzanas y peras).

Entre los factores del suelo que en mayor grado determinan la disponibilidad de Ca^{2+} se encuentran: Ca total suplementado, pH, CIC, porcentaje de saturación de Ca^{2+} en respecto con CIC, tipo de coloide del suelo y la relación de Ca^{2+} frente a otros cationes en la solución. En los suelos ácidos el Ca^{2+} no es rápidamente disponible para las plantas a bajas saturaciones, pues conforme decrece el porcentaje de Ca^{2+} en proporción a la CIC total, también decrece la cantidad de Ca^{2+} absorbido por

las plantas. El argumento propuesto también se aplica al tipo de mineral, pues los suelos con predominancia de arcillas tipo 2:1 requieren una mayor saturación de Ca^{2+} que aquellos con arcillas tipo 1:1. Específicamente la montmorillonita requiere un porcentaje de saturación mayor del 70% de Ca^{2+} para un adecuado suministro, mientras que la Caolinita presenta suficiente disponibilidad a 40–50% de saturación de Ca^{2+} . La nutrición normal de Ca^{2+} puede verse disturbado cuando el Mg^{2+} excede al Ca^{2+} (Havlin et al., 1999).

1.1.2 Magnesio

El magnesio es absorbido por las plantas como ión Mg^{2+} (Marschner, 1986; Mengel y Kirkby, 2000). Este elemento constituye normalmente cerca del 0,5% de la biomasa total de las plantas (Navarro y Navarro, 2003); sin embargo las diferentes especies vegetales pueden presentar un rango relativamente amplio en su contenido total (entre 0,07 y 9%) (Larcher, 2003).

Quizá el papel más conocido de Mg en la planta se relaciona con su aparición en el centro de la molécula de la clorofila, pigmento esencial para que las plantas verdes puedan llevar a cabo la fotosíntesis; pese a ello, la fracción del Mg total asociada a la clorofila es relativamente pequeña, pues sólo representa entre el 15 y 20% (Mengel y Kirkby, 2000).

Navarro y Navarro (2003) resaltan el hecho que el Mg es el único elemento metálico constituyente de la clorofila, y mencionan valores similares a los reportados por Mengel y Kirkby (1987) del Mg clorofílico (10–12%).

Entre otras funciones se puede mencionar: regulación del pH celular y el balance de catión–anión, síntesis de proteínas, activación de enzimas y transferencia de energía (Marschner, 1986).

Marschner (1986) sugiere que las funciones de Mg en las plantas se relacionen con su movilidad dentro de las células; la cual se debe a la capacidad de interactuar fuertemente con ligandos nucleofílicos (por ejemplo los grupos fosforil), a través de enlaces iónicos, y actuar como un elemento que establece puentes y/o formas complejas de diferentes niveles de estabilidad. Cabe aclarar que no todos los enlaces son iónicos; algunos, como los que establece en la molécula de la clorofila, son de tipo covalente.

Navarro y Navarro (2003), basándose en la alta difusión de Mg^{2+} en el floema, explican el porqué este elemento, en contraposición al Ca^{2+} , puede trasladarse fácilmente de las hojas viejas a las jóvenes cuando se presenta una deficiencia.

Con base en la relativa alta movilidad que presenta el Mg^{2+} no será difícil concluir que los síntomas de sus deficiencias se presentan primero en hojas más viejas; las cuales normalmente se caracterizan por una clorosis intervenal (Mengel y Kirkby, 2000; Navarro y Navarro, 2003).

Havlin et al. (1999) consideran que aquellos suelos que contienen menos de 25 a 50 mg kg^{-1} de Mg^{2+} intercambiable son probablemente deficientes en este nutriente. La saturación crítica de Mg^{2+} para un óptimo crecimiento de las plantas coincide estrechamente con este rango, pero en la

mayoría de los casos el porcentaje de saturación podría no ser menos de 10%. Es común la ocurrencia de las deficiencias de Mg^{2+} en suelos ácidos con altas tasas de aplicación de cales bajas en Mg; así mismo cuando se realiza un suministro elevado de fertilizantes amoniacales o potásicos, y en cultivos con alta demanda de Mg (Havlin et al., 1999).

1.1.3 Potasio

La absorción de potasio por las raíces ocurre en forma iónica K^+ (Marschner, 1986; Mengel y Kirkby, 2000). Su contenido exhibe una alta variabilidad, dependiendo de la especie y el órgano que se considere; en este sentido Navarro y Navarro (2003) citan los valores reportados por Demolón (1972), con un rango supremamente amplio (entre 0,35 a 7,1, expresado como porcentaje de K_2O de la materia seca).

El K^+ es considerado el catión más importante en la fisiología de las plantas, no solo por su contenido en los tejidos vegetales, sino por las funciones que desempeña. Su velocidad de absorción es alta, como consecuencia de la permeabilidad selectiva de las membranas vegetales; hecho que propicia la difusión facilitada (tanto de ingreso como de salida) de este nutriente para diversos procesos fisiológicos, entre los cuales se pueden citar: crecimiento meristemático, estado hídrico, fotosíntesis y transporte a larga distancia (Marschner, 1986; Mengel y Kirkby, 2000).

El K^+ , a diferencia de otros nutrientes no hace parte constitutiva de los principios esenciales (prótidos, lípidos y glúcidos), sino que tiende a permanecer en forma iónica. Debido a la gran movilidad que lo caracteriza actúa básicamente neutralizando ácidos orgánicos que resultan del metabolismo, y así asegurar la constancia de la concentración de H^+ en los jugos celulares (Navarro y Navarro, 2003).

El K es esencial en la translocación de azúcares y la formación de almidón. Las células oclusivas de los estomas lo requieren para su apertura y cierre, proceso importante en la eficiencia hídrica. El K estimula el crecimiento radical y mejora la resistencia de los cultivos a enfermedades; además, favorece la formación de vasos xilemáticos más grandes y distribuidos de una manera más uniforme en todo el sistema radical y mejora la calidad de las cosechas (Soil Improvement Committee California Plant Health Association, 2004).

De acuerdo con Soil Improvement Committee California Plant Health Association (2004), los síntomas de la deficiencia de K se relacionan con los siguientes eventos: i) crecimiento lento, ii) clorosis/necrosis en márgenes y ápices foliares, a partir de las hojas más viejas, iii) tallos débiles y iv) frutos pequeños o semillas arrugadas.

Ante situaciones de deficiencia, el K^+ se moviliza rápidamente desde los tejidos más maduros hacia los más nuevos con el fin de suplir los requerimientos nutricionales, y es por ello que los síntomas se manifiestan primero en las hojas viejas.

1.2 Calcio, magnesio y potasio en el suelo

1.2.1 Calcio

El calcio (Ca) es el quinto elemento más abundante en la corteza terrestre, con una concentración promedia que llega a representar cerca de 3,6% (Barber, 1995). Este procede principalmente de las rocas y los minerales que conforman el suelo; por lo tanto, su contenido puede variar ampliamente dependiendo del material de origen; en suelos considerados no alcalinos solo representa entre 0,1 y 0,2%, mientras que en los alcalinos alcanza el 25% (Havlin et al., 1999).

Barber (1995) sostiene que el contenido de Ca^{2+} depende del material parental, el grado de meteorización y la aplicación de enmiendas. Este autor reporta los siguientes valores para tres ordenes contrastantes del suelo en este nutriente: Aridisoles 5%, Alfisoles 1% y Oxisoles 0,6%.

Refiriéndose a las rocas fuentes de Ca^{2+} , la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_3$) es el feldespato más importante, aunque los piroxenos y anfiboles son también comunes en los suelos. Cantidades pequeñas de Ca^{2+} pueden provenir de biotita, apatita y de ciertos borosilicatos (Havlin et al., 1999).

En cuanto a los compuestos minerales, los carbonatos son de mayor representatividad; entre estos se encuentran: calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$). En un segundo lugar se puede mencionar a los fosfatos: fluorapatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, hidroxiapatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$, y carbonatoapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{CO}_3$). Adicionalmente, se puede referir a sulfato de calcio (CaSO_4) y silicatos aluminicos diversos: feldspatos y anfiboles. Finalmente, el Ca^{2+} se encuentra haciendo parte de la materia orgánica o en combinación con los ácidos húmicos y fosfóricos en los humatos y fosfolípidos cálcicos (Navarro y Navarro, 2003).

Las concentraciones de Ca^{2+} en el suelo normalmente superan a las requeridas para un crecimiento apropiado de las plantas; pese a ello ejercen poco efecto sobre la toma de Ca^{2+} , puesto que la absorción de Ca^{2+} es genéticamente controlada. En este sentido la concentración de Ca^{2+} en la solución del suelo es cerca de 10 veces mayor a la del K^+ ; pese a ello su toma es menor que este nutriente (Havlin et al., 1999).

Por regla general los suelos de textura gruesa y aquellos que se ubican en regiones húmedas, formados a partir de rocas pobres en minerales de Ca tienen bajos niveles de Ca^{2+} . En contraposición a lo anterior, los suelos de textura fina, formados a partir de rocas que son ricas en este elemento, contienen mucho mayores contenidos de Ca total y Ca^{2+} intercambiable (Havlin et al., 1999).

Los suelos antiguos, altamente meteorizados y lavados bajo condiciones húmedas, generalmente tienen bajos niveles de Ca^{2+} . En ambientes áridos los altos contenidos de Ca en las capas más superficiales pueden presentarse en forma de acumulaciones de yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Mengel y Kirkby, 2000).

El gas carbónico disuelto en el agua de percolación puede formar iones H^+ que llegan a desplazar tanto al Ca^{2+} como a otros cationes del complejo de cambio. En el caso que la percolación sea alta a través del perfil, los suelos gradualmente se acidifican (Havlin et al., 1999).

1.2.2 Magnesio

El magnesio (Mg) es el octavo elemento más común en la litosfera, con una concentración promedia 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).

Dados los diferentes grados de meteorización y materiales parentales, los contenidos de Mg^{2+} varían enormemente (Barber, 1995). En este sentido Havlin et al. (1999) reportan valores bajos (0,1%) para suelos de textura gruesa en regiones húmedas, y valores altos (4%) para suelos con texturas finas y zonas áridas o semiáridas formados a partir de materiales parentales ricos en Mg^{2+} .

El Mg es constituyente de numerosos minerales, mayoritariamente silicatos; siendo los más frecuentes la biotita ($Si_3O_{10}AlK(MgFe)_3(OH)_2$), serpentinas ($Si_2O_9Mg_3H_4$), y olivino (SiO_4FeMg). También se encuentran formando parte de los minerales secundarios arcillosos como clorita, vermiculita y montmorillonita. En algunos suelos el Mg también está presente como magnesita ($MgCO_3$) y dolomita ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). Adicionalmente, la descomposición de la materia orgánica puede contribuir a la incorporación de este nutriente al suelo (Navarro y Navarro, 2003).

El Mg^{2+} en el suelo puede estar básicamente en tres formas: i) como constituyente de minerales, ii) como catión intercambiable en el complejo de cambio y iii) en la solución del suelo; lo anterior sin tener en cuenta que pequeñas cantidades de Mg se encuentran presentes en la fracción orgánica (Barber, 1995).

Navarro y Navarro (2003), refiriéndose a la disponibilidad de Mg^{2+} , catalogan las formas inorgánicas de la siguiente manera: Mg lentamente asimilable (no intercambiable), Mg^{2+} asimilable (intercambiable) y Mg^{2+} rápidamente asimilable (solución del suelo).

La concentración normales de Mg^{2+} en la solución del suelo en las regiones templadas varía entre 5 y 50 mg kg^{-1} (Havlin et al., 1999). 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 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-CIC; en suelos calcáreos el nivel de Mg^{2+} es inherentemente bajo (Havlin et al., 1999).

El Mg^{2+} intercambiable es por lo general del orden del 5% del Mg total, y constituye normalmente entre el 4 y 20% de la CIC, valor considerablemente menor que el de Ca^{2+} (80%), y mayor que el de K^+ (cerca de 4%) (Mengel y Kirkby, 2000).

1.2.3 Potasio

La litosfera contiene en promedio 1,9% de este elemento. La concentración de K en el suelo (1,2%), es inferior a la de la litosfera, como consecuencia de su meteorización; en este sentido, los suelos jóvenes y poco meteorizados, tienen altos niveles de K^+ . Los suelos orgánicos son pobres en su contenido (menor de 0,03%), dado su bajo nivel de minerales (Barber, 1995).

La mayor parte de K de la corteza terrestre se encuentra unido a minerales primarios o está presente en las arcillas secundarias que conforman ampliamente la fracción arcillosa. Los suelos arenosos muy meteorizados contrastan marcadamente con los suelos jóvenes derivados de materiales volcánicos, en los que los contenidos de arcilla y de K son generalmente altos (Mengel y Kirkby, 2000).

Los minerales que generalmente se consideran como fuentes originales de K en su orden de disponibilidad son biotita>muscovita>feldespatos potásicos. Estos presentan la siguiente composición: biotita: $K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}$, feldespatos potásicos: KSi_3AlO_8 y la muscovita $(SiO_4)_3H_2Al_3K$. Otras formas minerales son silvina: $KCl.NaCl$ y carnalita: $KCl.Cl_2Mg.6H_2O$; también puede estar presente en ilitas, vermiculitas, cloritas, entre otros minerales (Navarro y Navarro, 2003).

En el suelo el K puede clasificarse en las siguientes cuatro categorías: i) K^+ de la solución, ii) K^+ intercambiable, iii) K difícilmente intercambiable, y iv) K mineral (Barber, 1995; Havlin et al., 1999). Navarro y Navarro (2003) adicionan a las anteriores la forma orgánica y establecen la siguiente clasificación basada en su disponibilidad: no asimilable, lentamente asimilable y rápidamente asimilable.

Havlin et al. (1999), basándose en la anterior clasificación reportan los siguientes valores para la concentración de K: mineral 5000–25000 $mg\ kg^{-1}$, no-intercambiable 50–750 $mg\ kg^{-1}$, intercambiable 40–600 $mg\ kg^{-1}$ y en solución 1–10 $mg\ kg^{-1}$.

La forma más disponible es el K^+ de la solución, seguido por el intercambiable. Otras dos formas en orden de disponibilidad son el K no-intercambiable que reside en las intercapas de las arcillas tipo 2:1, y la forma mineral (Bohn et al., 2001).

El K^+ también puede estar fijado en el suelo. Este proceso ocurre predominantemente en las arcillas 2:1 y en grandes cantidades en illita, limitando su disponibilidad para las plantas. La fijación consiste en una fuerte retención del ión K^+ en las capas laminares de estas arcillas. El K^+ de la solución del suelo, el liberado de los minerales o proveniente de la fracción intercambiable, es atrapado firmemente por fuerzas electrostáticas entre las láminas de las arcillas debido a que es suficientemente pequeño. Sólo el NH_4^+ , por tener un radio iónico similar, puede competir con el K^+ por estos sitios de retención. Esta forma de K^+ es lentamente asimilable para las plantas (Bohn et al., 2001).

Entre los factores que determinan la disponibilidad de K^+ se encuentran: cantidad y tipo del mineral arcilloso, CIC, contenido de K^+ intercambiable, capacidad del suelo para fijar el K^+ , la humedad, la temperatura, la aireación y el pH del suelo (Havlin et al., 1999).

1.3 El intercambio catiónico y su relación con la disponibilidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+

1.3.1 Generalidades

Gracias a su carga negativa, la fracción coloidal de la fase sólida del suelo, constituida principalmente por las arcillas finas y la materia orgánica, es el mayor reservorio de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ para las plantas. De esta manera, estos cationes y otros elementos con cargas positivas (Na^+ , Al^{3+} y Mn^{2+}) son adsorbidos por la superficie negativamente cargada de estas partículas coloidales, las cuales se mueven de manera dispersa en una solución electrolítica (Bohn et al., 2001; Barber, 1995; Havlin et al., 1999; Mengel y Kirkby, 2000).

Las fuerzas que tienden a unir firmemente los cationes a la superficie de los coloides organominerales son de naturaleza interiónicas; mientras que las fuerzas que tienden a disociarlos son de naturaleza cinética en forma de movimiento térmico. Como consecuencia de lo anterior se establece un gradiente de potencial eléctrico, cuyo equilibrio ocurre entre la estructura coloidal, los cationes y la solución libre (Mengel y Kirkby, 2000).

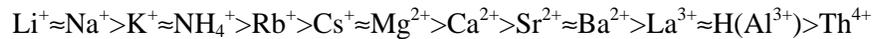
Los cationes adsorbidos pueden ser desplazados por otros como consecuencia de diversos factores, a saber: la fuerza de adsorción del ión, su predominancia y concentración en la solución del suelo, la presencia de otros cationes en la solución y la selectividad del catión, entre otros. El anterior proceso, caracterizado por ser reversible, estequiométrico y rápido se denomina **intercambio catiónico** (Bohn et al., 2001).

1.3.2 Selectividad catiónica

El término de selectividad de intercambio iónico en el suelo es utilizado para expresar la relación entre los iones en la superficie de los coloides y los iones en la solución del suelo. Esta selectividad depende básicamente de la naturaleza y la cantidad de los componentes inorgánicos y orgánicos, además del potencial iónico (Loyola y Pavan, 1989; Sparks, 2003).

En general, existe una relación directa entre la valencia del ión y la fuerza con que es retenido por los sitios de intercambio; en este sentido, los cationes trivalentes se adsorben más firmemente que los bivalentes, y estos a su vez son retenidos con más fuerza que los monovalentes. Adicionalmente, entre los cationes de igual carga, aquel con menor radio de hidratación o potencial iónico presenta una adsorción más firme (Bohn et al., 2001; Sparks, 2003). La facilidad con la que se puede

reemplazar un ión por otro se ha denominado *serie liotrópica*; un ejemplo de ello, dado por Bohn et al. (2001) es:



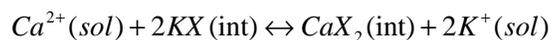
Essington (2003) define el potencial iónico como la relación entre la valencia del ión (Z) y su radio iónico (r), así: Z/r . El radio iónico es, al igual que el radio atómico, la distancia entre el centro del núcleo del átomo y el electrón estable más alejado del mismo, pero haciendo referencia no al átomo, sino al ión. El potencial iónico (ϕ) constituye una medida de la densidad de carga de los iones. Al aumentar la magnitud de esa densidad de carga se fortalecen los enlaces con otros iones.

Un factor determinante en la retención selectiva de cationes es la Capacidad de Intercambio Catiónica–CIC, pues los suelos con una densidad de carga más elevada generalmente prefieren los cationes altamente cargados. Un ejemplo de lo anterior ocurre cuando se someten las arcillas vermiculita y montmorillonita a una solución con Ca^{2+} y Na^+ ; en este caso la vermiculita retiene una mayor cantidad de Ca^{2+} que la montmorillonita, mientras que esta última retiene más Na^+ . Un mecanismo de selectividad tiene lugar entre la vermiculita y el Mg^{2+} , en cuyo caso se cree que este elemento en su forma hidratada se ajusta bien dentro de la red de agua entre las capas parcialmente expandidas. Otro caso muy particularmente ocurre por la alta preferencia de las vermiculitas y las aristas intemperizadas de micas trioctaédricas por el K^+ y otro catión similar como NH_4^+ .

En general, los minerales del suelo presentan una mayor atracción de superficie por los cationes menos hidratados y los compuestos orgánicos por los cationes polivalentes, principalmente cuando los grupos carboxílicos están ligados por átomos de carbono adyacente (Loyola y Pavan, 1989). Referente a este tema, Bohn et al. (2001) aclaran que en suelos ricos en la materia orgánica el incremento del pH y la elevación subsecuente de la CIC, puede cambiar la selectividad catiónica, pues se dará una mayor preferencia a los polivalentes sobre los monovalentes.

La evaluación del intercambio catiónico y la selectividad de un ión sobre otro en un suelo dado, generalmente se realiza mediante sistemas binarios, por ejemplo K^+ y Mg^{2+} o Na^+ y Ca^{2+} (Bohn et al., 2001; Sparks, 2003).

Como ejemplo puede considerarse la siguiente reacción reversible de intercambio:



En esta reacción un ión de Ca^{2+} en la solución del suelo (sol) reemplaza a dos iones de K^+ de la fase intercambiable X (int). La constante termodinámica del equilibrio (K), como una medida de la selectividad, para la reacción en particular se describe así (Sposito, 2008):

$$K = \frac{(\text{CaX}_2)(\text{K}^+_{\text{sol}})^2}{(\text{KX})^2(\text{Ca}^{2+}_{\text{sol}})}$$

siendo: X=una mol de la fracción intercambiable, los paréntesis () denotan las actividades de las especies químicas involucradas en la reacción de intercambio.

Existen diferentes tipos de coeficientes de selectividad para describir el equilibrio; entre estos se encuentran los propuestos por Kerr, Gapon, Vanselow, etc. (Bohn et al., 2001; Essington, 2003, Sparks, 2003; Sposito, 2008). Una de las ecuaciones mundialmente más utilizadas es la de Vanselow; ésta se diferencia de la ecuación de Kerr por tener un enfoque termodinámico en lugar de la acción de las masas y, por considerar las actividades de los iones en la solución, en lugar de sus concentraciones (Alleoni et al., 2009; Sparks, 2003).

La selectividad catiónica es particularmente de interés para el manejo de problemas agrícolas, tal es el caso de suelos sódicos (excesivos niveles de sodio intercambiable) y ácidos (con diferentes especies de aluminio intercambiable), o entender lo que puede suceder con elementos como NH_4^+ y K^+ luego de su aplicación. Los mayores esfuerzos para un mejor entendimiento de los anterior fenómenos han sido dirigidos hacia diversos modelos para caracterizar y predecir la distribución de equilibrio de un ión intercambiable entre las fases adsorbida y la acuosa. Estos modelos emplean los principios de la acción de masas del catión y describen la partición del ión usando un coeficiente de selectividad de intercambio, parámetro que a pesar de no ser una constante verdadera, es útil y puede ser empleado para aproximarse a la realidad (Essington, 2003).

Existen diferentes métodos para estudiar experimentalmente el fenómeno de la adsorción, siendo el más empleado el de “batch” a nivel de laboratorio por ser simple, rápido y replicable. En éste se ponen en contacto una cantidad conocida de suelo y de soluciones que contienen un ión de interés, se agita por un período de tiempo determinado, al término del cual se asume que el sistema alcanzó un equilibrio de reacción. Se centrifuga y/o se filtra la suspensión, y se mide la concentración del soluto remanente y se sustrae de la concentración inicialmente adicionada. La cantidad de soluto sustraída de la fase líquida se define como la proporción del soluto que fue adsorbida por la fase sólida. Otros métodos son batch *in situ* y columnas de flujo (Casagrande y Soares, 2009).

En la mayoría de los estudios basados en la técnica de batch, los investigadores prefieren desarrollar sistemas binarios de intercambio (por ejemplo Ca–Mg), mediante la utilización de soluciones en las cuales varían las fracciones equivalentes de los elementos, manteniendo constante la fuerza iónica (Sposito, 2008).

En este punto es razonable recordar que la fuerza iónica de la solución (I) afecta la actividad de los iones (α), pues combina el efecto de la concentración (M =Molaridad) y la carga del ión (Z), dado que (Bohn et al., 2001):

$$\alpha = \gamma M$$

donde γ es el coeficiente de actividad

además,

$$\log \gamma = A Z_i^2 I^{1/2}$$

donde A es una constante (0,511)

y

$$I = \frac{1}{2} \sum M_i Z_i^2$$

Basándose en lo anterior, Mc Bride (1994) resalta que las soluciones con una mayor fuerza iónica son menos “ideales” en el sentido que los iones individuales interactúan más fuertemente con los iones vecinos de carga opuesta. Esta atracción electrostática generalmente baja la concentración efectiva de los iones, es decir su actividad.

A medida que la concentración de las sales aumenta, es decir que existe una mayor fuerza iónica, la superficie de intercambio se vuelve más selectiva por los cationes de menor valencia; entretanto la dilución favorece la retención de los iones con mayor carga. En los estudios de isotermas binarias de intercambio, el efecto del incremento de la fuerza iónica se refleja en una mayor distancia de las curvas con respecto a la línea de no-preferencia (Essington, 2004).

De acuerdo con Feigenbaum et al. (1991), los intercambios que tienen lugar en el suelo entre Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , ocurren de manera simultánea; sin embargo, la mayoría de la información publicada se obtiene a partir de sistemas binarios. Aunque los aspectos teóricos que soportan la validez de los coeficientes de selectividad para sistemas ternarios, obtenidos a partir de sistemas binarios, todavía no han sido bien esclarecidos, las diferencias encontradas hasta ahora entre los dos sistemas no son significativas. Para soportar lo expuesto, Feigenbaum et al. (1991) se basaron en una alta correlación entre los coeficientes de selectividad obtenidos en dos suelos calcáreos. En una investigación realizada sobre suelo esmectítico en torno a modelos binarios y ternarios de Ca–K–Na, Wada y Seky (1994) obtuvieron resultados similares para el intercambio K–Ca, más no para Na–Ca.

Concientes del efecto de la fuerza iónica en la selectividad catiónica, pero con miras de dar un paso hacia la realidad de intercambios que ocurren en la naturaleza de manera simultánea, Loyola y Pavan (1989) proponen una metodología en la que se estudia el intercambio catiónico a través de tratamientos (soluciones de intercambio) con diferentes fuerzas iónicas (1, 2, 4 y 8 mmol L⁻¹) y concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ (0,25; 0,50; 1,00 y 2,00 mmol_c L⁻¹), pero manteniendo siempre una relación molecular entre los cationes igual a 1,0. Entre las ventajas adicionales de dicha metodología se puede resaltar el menor número de tratamientos, lo cual facilita el estudio para un mayor número de suelos.

Según Goulding (1983), la constante termodinámica de intercambio (K_{ex}) o la energía libre de intercambio (ΔG_{ex}^o) exponen mejor la selectividad, es decir la afinidad relativa del intercambiador por un catión. De acuerdo con Sparks (2003), una de las ventajas de emplear estos parámetros radica en que no son afectados por la fuerza iónica de la solución.

La constante termodinámica de equilibrio (K_{eq}) o de intercambio (K_{ex}) resulta de (Essington, 2004; Sparks, 2003):

$$\ln K_{ex} = \int_0^1 \ln K_v d\bar{E}_A,$$

donde el coeficiente de selectividad de Vanselow (K_v) y la fracción equivalente del catión A (\bar{E}_A), son integrados bajo la curva para valores de \bar{E}_A desde 0 hasta 1. En el estudio del intercambio catiónico A–B, la fracción equivalente \bar{E}_A corresponde a la proporción relativa del catión A en la fase intercambiable frente a la suma de A y B, así: $[A/(A+B)]$.

La energía libre estándar de intercambio de Gibbs (ΔG_{ex}^o) expresa la selectividad general o conjunta de un intercambiador a temperatura y presión constantes, e independiente de la fuerza iónica. Para su cálculo se emplea la siguiente fórmula (Essington, 2004; Sparks, 2003):

$$\Delta G_{ex}^o = -RT \ln K_{ex},$$

donde R es una constante de los gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y T, la temperatura (se asume que $T=293 \text{ K}$). Para el intercambio K–Ca un valor negativo de ΔG_{ex}^o podría indicar que el producto o K^+ es preferido, mientras que un valor positivo indicaría que se prefiere el reactante, por ejemplo Ca^{2+} .

1.4 Efecto de las aplicaciones de Ca, Mg y K sobre sus contenidos en el suelo

En ocasiones la aplicación de las diferentes relaciones de Ca:Mg en forma de cales (carbonatos) no logran variaciones proporcionales de estos elementos en el suelo de acuerdo con las cantidades aplicadas; comportamiento que se ha relacionado con las diferencias en la solubilidad de las fuentes empleadas (Oliveira, 1993; Böll y Nakagawa, 1995; Oliveira y Parra, 2003), y la selectividad del ión (Böll y Nakagawa, 1995). En otras oportunidades se reportan interacciones entre estos dos elementos (Lopera et al., 1979; Silva, 1980), o el efecto amortiguador del suelo (Oliveira, 1993).

Defelipo y Braga (1983) se basaron en la influencia del encalado sobre el incremento de la CIC para evaluar la adsorción de K^+ en diez suelos procedentes del Estado de Minas Gerais (Brasil), clasificados como Latosoles. Para corregir la acidez se utilizó una mezcla de $CaCO_3$ y $MgCO_3$ en relación 4:1, y como fuentes de K^+ se emplearon cloruro, fosfato y sulfato. Con el encalamiento se incrementó la adsorción de K^+ , independiente de la fuente utilizada. Cuando no se encaló fue mayor la adsorción de K^+ con fosfato y sulfato que cloruro, sin que hubiera diferencias entre las primeras dos fuentes. El aumento de la adsorción de K^+ debido al encalamiento se relacionó con dos hechos, el primero la mayor facilidad de K^+ para sustituir Ca^{2+} que Al^{3+} en el complejo de cambio; el segundo estaría relacionado con el aumento de las cargas negativas por la elevación del pH. Los suelos presentaron gran variación en la adsorción de K^+ , tendencia que no se correlacionó con la CIC ni con el contenido de la materia orgánica del suelo.

Németh et al. (1970) evaluaron la relación entre los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el “extracto de saturación” y algunas propiedades del suelo en 72 muestras procedentes de norte de Alemania que presentaban texturas diferentes. La concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} en el extracto se incrementó

con el aumento de la fracción intercambiable, independiente de la textura del suelo. Un comportamiento similar fue observado para el K^+ , pero solamente cuando los suelos se clasificaron por su textura; la pendiente de la línea de regresión resultante de la concentración de K^+ en la solución y el K^+ intercambiable fue más bajo en los suelos con mayor contenido de arcillas y limos. Los coeficientes de la ecuación de Gapon, calculados a partir de K^+ y Ca^{2+} intercambiable, y su correspondiente en el extracto, varió en un rango amplio; estos se incrementaron con una reducción de la concentración de K^+ de la solución y fueron mayores en los suelos limo arenosos y francos que en los arenosos y arenos limosos.

Jarvan (2004) empleó mezclas de cales y otros materiales para corregir problemas de acidez de turberas y modificar así las relaciones entre las bases intercambiables en suelos de Estonia. Los contenidos y las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ variaron dependiendo del tipo de material encalante empleado.

Henao y Delvaux (1998) estudiaron la dinámica de K^+ y Mg^+ en diez suelos de la zona cafetera central colombiana, mediante técnicas de intercambio. El número de sitios de adsorción selectiva de K^+ varió dependiendo del tipo de suelo. Entre los Andisoles, las unidades Chinchiná en Caldas y Fresno se distinguieron por una cantidad muy baja de sitios específicos por K^+ ; mientras que en las unidades Líbano y Montenegro la capacidad de almacenamiento de este elemento fue mucho más alta, al igual que las unidades clasificados como Alfisoles e Inceptisoles. El poder amortiguador de K^+ estuvo estrechamente relacionado con la CICE y del número de sitios específicos; el valor de este parámetro creció con el grado de alteración de los suelos estudiados y de su tenor en arcilla.

Díaz (2006) determinó en cinco unidades de suelo de la zona cafetera colombiana el efecto de algunas dosis de cal agrícola (1,25; 2,5; 5,0 y 10,0 $g\ dm^{-3}$ de suelo), sobre las características químicas del suelo, empleando una fuente con 51% de CaO y 2% de MgO . Con el incremento de las dosis aplicadas se incrementaron los niveles de Ca^{2+} extraídos con acetato de amonio (CH_3COONH_4) normal y neutro; pese a ello, la tasa del aumento de este elemento no fue igual en todos los suelos. El comportamiento de la respuesta al Mg^{2+} presentó una tendencia cuadrática en cuatro de los suelos evaluados; tendencia que se relacionó con la competencia entre Ca^{2+} y Mg^{2+} en dosis altas de Ca .

1.5 Efecto de las variaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en cultivos

1.5.1 Generalidades

La disponibilidad de los nutrientes del suelo para las plantas depende de la cantidad y la naturaleza de estos en la solución del suelo, y su asociación con los nutrientes adsorbidos o contenidos en la fase sólida. En cuanto a las interacciones negativas o “competencias” entre los nutrientes y la absorción por las plantas se refiere, se consideran importantes las siguientes relaciones antagónicas: K^+ sobre Mg^{2+} , K^+ sobre NO_3^- , Ca^{2+} sobre Mg^{2+} , $H_2PO_4^-$ sobre Zn^{2+} y NO_3^- sobre $H_2PO_4^-$ (Barber, 1995).

El hecho de que las células vegetales estén cargadas negativamente, implica la presencia de un exceso equivalente negativo. De esta forma, la especie más rápidamente absorbida tienden a neutralizar los equivalentes aniónicos disponibles reduciendo así la carga electrostática para los demás cationes. La velocidad de absorción depende del mecanismo de absorción y de la concentración de iones individuales presentes en la solución nutritiva. Estas reacciones pueden darse por competencia no específica pero también por efectos de competencia entre transportadores (Mengel y Kirkby, 2000).

El flujo de K^+ a través de la membrana puede reducirse severamente en presencia de otros cationes como NH_4^+ , Na^+ , etc., siendo algunas plantas más sensibles que otras. Nieves et al. (2007), registran una reducción del 28% en el crecimiento del tomate, cuando dicho cultivo fue sometido a una alta concentración de NH_4^+ en solución del suelo que contenía K^+ . Los mecanismos asociados a este fenómeno fueron relacionados con la competencia de ambos iones para entrar a la célula. Del mismo modo, Alemán et al. (2009) sostienen que al incrementar la concentración de Na^+ en la raíz de algunas especies, se limita sustancialmente la absorción de otros cationes como el Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Fonseca y Meurer (1997) demostraron que en maíz (*Zea mays*) el K^+ puede inhibir la absorción de Mg^{2+} cuando la concentración de este último en la solución externa es baja, en tanto que el Mg^{2+} no afecta la absorción de K^+ ; es más, su influjo puede aumentarse con las altas concentraciones de Mg^{2+} en el medio externo. En contraste a lo anterior, Ding et al. (2006), hallaron que un exceso de Mg^{2+} , junto con una baja concentración de K^+ , disminuye la actividad de la enzima nitrato reductasa y la concentración de azúcares en las hojas de arroz (*Oriza sativa*), como consecuencia de un fuerte efecto antagónico; en tal caso, la deficiencia de Mg^{2+} no se compensó por un moderado suministro de K^+ , pero se acrecentó con el exceso de K^+ , hecho que de acuerdo con los autores sugiere roles específicos de Mg^{2+} , tanto en la producción de la biomasa seca como en la distribución de los asimilados de carbono en la planta de arroz.

La disponibilidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ para las plantas, al igual que otros elementos, está en función de su contenido en la fase intercambiable (Factor Cantidad-Q) y en la solución (Factor Intensidad); adicionalmente, los coloides de los suelos difieren en su habilidad para mantener la concentración de los elementos en la solución (Factor Capacidad), debido a su naturaleza y composición química (Havlin et al., 1999; Mengel y Kirkby, 2000).

Además de los anteriores factores, muchos autores citados abajo aseguran que la disponibilidad de las bases intercambiables también puede afectarse con la proporción relativa de estos, es decir su cantidad frente a los demás cationes y/o con respecto a la CIC (determinada analíticamente) o CICE (CIC efectiva, determinada por la suma de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y Al^{3+}).

Una de las investigaciones pioneras (quizás la primera) sobre el tema fue desarrollada por Bear y Toth (1948), quienes analizaron la influencia de Ca^{2+} sobre la disponibilidad de otros cationes del suelo. En este trabajo los autores en referencia sustentan que idealmente un suelo debe presentar los siguientes niveles de saturación de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el complejo de intercambio para que pueda soportar buenos rendimientos: 65%, 10% y 5% respectivamente. En este mismo orden de ideas las relaciones que se establecen entre estos elementos son: Ca:Mg 6,5:1, Ca:K 13:1 y Mg:K 2:1. Para su afirmación, Bear y Toth se basaron en los resultados de diversas investigaciones que se desarrollaron en torno a las necesidades y el "estatus" de estos elementos durante ocho años en 20 suelos representativos de New Jersey (EUA).

Apoyados en lo anterior se han realizado un número considerable de investigaciones con el fin de determinar el efecto de las variaciones de estos tres cationes intercambiables sobre el desarrollo y la producción de muchas especies vegetales, sin que sus resultados sean de todo concluyentes. Son algunas de estas las desarrolladas por Böll y Nakagawa (1995), Ding et al. (2006), Fonseca y Meurer (1997), Liebhardt (1981), Lopera et al. (1979), Mc Lean y Carbonell (1972), Meurer y Anghinoni (1993), Moreira et al. (2005), Muchovej et al. (1986), Oliveira (1993), Oliveira et al. (2001), Oliveira y Parra (2003), Silva (1980), Silva y Meurer (1988), Taira et al. (2004).

Aunque los objetivos de los estudios en referencia son semejantes, el enfoque y las metodologías varían, pues algunos sólo consideran dos de los elementos (principalmente el Mg^{2+} y el K^+), otros involucran a los tres; muchos han dirigido su atención hacia los problemas de la acidez y el manejo de la fertilidad del suelo con miras a encontrar un equilibrio entre las bases, otros por el cambio consideran las interacciones de estos nutrientes mediante técnicas de hidroponía. Adicionalmente, diversas investigaciones han tenido en cuenta solamente el suelo, mientras que otros involucran la respuesta de la planta mediante la determinación de diferentes variables biológicas (biomasa seca, absorción de nutrientes por órganos específicos, actividad enzimática, asociaciones con microorganismos benéficos o patogénicos, etc.). Por último cabe resaltar acerca de la diversidad de variables edáficas que se han tenido en cuenta dentro de estos estudios, entre los cuales se pueden mencionar: los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo, sus relaciones [Ca/Mg, Ca/K, Mg/K, (Ca+Mg)/K] en estas dos fases, la cantidad relativa de estos elementos con respecto a la CIC o CICE (expresados en términos de porcentajes de saturación), la actividad y la energía de intercambio de estas bases, y su relación con otras propiedades del suelo (la mineralogía, la textura, etc.), entre otros. A continuación se presentan algunos ejemplos relacionados con lo anterior.

1.5.2 Efecto de las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en diversos cultivos

En las siguientes investigaciones se ha podido relacionar alguno de los parámetros objeto de estudio con la respuesta de algunos cultivos.

Silva y Meurer (1988) agruparon 14 suelos de Brasil en tres categorías con base en su CIC (<5 , entre 5 y 9 y >9 $cmol_c\ kg^{-1}$) con el fin de encontrar mejores indicadores de la disponibilidad de K^+ para el cultivo de trigo (*Triticum sativum*). De esta manera se logró obtener modelos con mayor significancia y niveles diferentes de K^+ intercambiable para la máxima producción de materia seca en cada caso.

Para la misma zona, Meurer y Anghinoni (1993) se propusieron encontrar otros parámetros del suelo, diferentes al K^+ intercambiable para predecir la disponibilidad de este elemento para el sorgo (*Sorghum vulgare* L.). Al considerar el conjunto de los datos se encontró una significancia limitada para expresar la disponibilidad de K^+ ; los demás parámetros por sí solos tampoco lograron explicar las variaciones en el rendimiento, pero una vez que los suelos fueron agrupados de acuerdo con su mineralogía y CIC se mejoró significativamente la predicción; en este sentido el mejor indicador fue la relación K^+/CIC .

Böll y Nakagawa (1995) utilizaron un suelo clasificado como Latosol de textura media con el propósito de estudiar el efecto de las variaciones en las relaciones de Ca:Mg en la producción y absorción de nutrientes en ajo (*Allium sativum* L.). Se aplicaron siete tratamientos a base de carbonatos de Ca y de Mg (relaciones 0:1, 1:0, 1:10, 1:4; 1:1, 4:1 y 10:1); manteniendo constante la saturación de bases en 75%, mediante la aplicación de K. Los tratamientos lograron modificar los contenidos y las relaciones en la fase intercambiable, en la solución y en las hojas. La relación de Ca:Mg afectó la producción solamente cuando fue muy desbalanceada, como consecuencia de contenidos mayores de Mg^{2+} frente al Ca^{2+} . Para relaciones altas de Ca:Mg la producción no se afectó.

En un trabajo desarrollado sobre un Latosol de Brasil, Oliveira et al. (2001) evaluaron el efecto combinado de la nutrición potásica (siete dosis) y el encalamiento con cal dolomítica (cinco niveles) en soya (*Glycine max*). Cuando la relación (Ca+Mg)/K intercambiables era superior a 36 ó la relación de los contenidos foliares (Ca+Mg)/K superior a 3,6, se obtuvieron las menores producciones de materia seca. Las producciones más altas, asociadas a un “mejor equilibrio” de los niveles foliares de K, Ca y Mg, se obtuvieron cuando esta relación en el suelo se encontraba entre 20 y 30; parámetro que mostró ser un índice importante para determinar la disponibilidad de K^+ en el suelo para este cultivo.

Con el propósito de hallar un buen balance entre Ca^{2+} y Mg^{2+} para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en la región de Cerrado (Brasil), Silva (1980) determinó el efecto de diferentes tratamientos a base de carbonatos de Ca y de Mg (proporciones 4:1, 3:1, 2:2, y 0:4), de P (0, 75, 150 y 300 $mg\ kg^{-1}$) y de K (0, 50 y 100 $mg\ kg^{-1}$). La respuesta del rendimiento en materia seca presentó el mismo comportamiento para todos los niveles de P y K dentro de cada relación de Ca y Mg. La biomasa de las raíces y de la parte aérea se disminuyeron al reducir las relaciones Ca:Mg, siendo la mejor relación el tratamiento más alto de Ca y la más baja de Mg; mediante el cual se lograron entre el 63 y 70% de saturación de Ca^{2+} para los dos suelos.

Lopera et al. (1979), a través de la aplicación diferencial de $CaCO_3$ y $MgCO_3$ lograron aumentar los niveles de pH, Ca^{2+} y Mg^{2+} de tres Histosoles ácidos cultivados con cebolla (*Allium cepa* L.). Para una relación de Ca/Mg inferior a 0,5 el rendimiento de bulbos se vio afectado, más no así para valores entre 0,5 y 6,5. No se logró obtener una relación crítica con la menor concentración de Mg^{2+} , y por lo tanto la mayor de Ca^{2+} ; adicionalmente, la producción no se alteró cuando los contenidos de Mg^{2+} alcanzaron 1,5 $cmol_c\ kg^{-1}$, si el Ca^{2+} fuera suficiente. Los autores sugieren tener en cuenta la relación Ca/Mg para condiciones de estudio cuando se realizan labores de encalamiento.

En el estudio conducido por Moreira et al. (2005) se determinó el efecto de la relación de Ca:Mg en un Oxisol cultivado con alfalfa (*Medicago sativa* L.). Se evaluaron diferentes tratamientos, variando la cantidad de la cal y la relación Ca:Mg. Con un incremento en la relación K/(Ca+Mg) intercambiables disminuyeron los contenidos de Ca y Mg en la materia seca aérea y en la fase intercambiable. La saturación de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} correlacionaron directamente con la producción y el aumento de la relación K/(Ca+Mg) redujo el pH y aumentó la acidez potencial del suelo.

Para *Brassica campestris* (mostaza salvaje), cultivada bajo condiciones controladas en dos tipos de suelo de Japón, las relaciones Mg:K y Ca:Mg en la solución del suelo fueron mejores indicadores que la fracción intercambiable para predecir el crecimiento de las plantas (Taira et al., 2004).

A continuación se presentan algunos estudios en los cuales el rendimiento no se relacionó con las relaciones de las bases arriba mencionadas.

Con el fin de estudiar el efecto de los cambios en las relaciones entre Ca^{2+} y Mg^{2+} (0,5, 1, 2, 4, 6 y 8) sobre el crecimiento y producción de frijol, Oliveira y Parra (2003) llevaron a cabo una investigación con dos suelos lateríticos de Brasil, a los que aplicaron carbonato de Ca y de Mg. Los tratamientos influyeron sobre la toma de estos dos elementos; en este sentido el incremento de la relación se tradujo en una elevación de Ca^{2+} y la reducción de Mg^{2+} . Pese a lo anterior las variaciones obtenidas en las relaciones en referencia no afectaron los rendimientos de la materia seca de las plantas.

Oliveira (1993) condujo una investigación en el que se utilizó un suelo clasificado como Typic Haplorthox, para evaluar el efecto de tratamientos resultantes de la combinación factorial de tres niveles de saturación de bases intercambiables (40, 60 y 80%) y siete relaciones de Ca/Mg (1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12) sobre el maíz. Las variaciones de las relaciones Ca/Mg no afectaron el rendimiento de la materia seca. Los aumentos en las relaciones de Ca/Mg condujeron al aumento de Ca y la disminución del Mg en el tejido. Los incrementos en los contenidos de Mg^{2+} en suelos con niveles semejantes de Ca^{2+} intercambiable, disminuyeron su concentración en el tejido de maíz. Un comportamiento semejante se observó con relación al Mg^{2+} intercambiable.

En el cultivo de soya, y para un Typic Haplorthox, se determinó la influencia de cuatro niveles de encalado (0,5; 1; 2 y 4 veces el contenido de aluminio intercambiable), y cinco relaciones de Ca:Mg (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100) en la región de Cerrado (Brasil) (Muchovej et al., 1986). Conforme al aumento de la cal se incrementaron los valores del pH y los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} , dependiendo de las proporciones; generando así relaciones de Ca:Mg entre 0,25:1,0 y 24:1,0. Pese a lo anterior la biomasa seca de las plantas no se vio afectada por los tratamientos. La falta de respuesta al Mg^{2+} se atribuyó a sus niveles iniciales, y se concluyó que éste fue un factor más importante que las relaciones entre las dos bases.

Mediante un diseño factorial, resultante de cuatro niveles de K y siete tratamientos de encalado, se evaluó la relación de la saturación de bases en un suelo franco arenoso en Delaware (Liebhardt, 1981). Se lograron amplios rangos de pH y porcentajes de saturación de las bases intercambiables; pese a ello los valores óptimos encontrados fueron diferentes a lo establecido para la región. Se demostró que estos parámetros no garantizan un incremento en la producción, y que incluso pueden afectar de manera negativa la rentabilidad del renglón al aumentar los costos de producción; en este orden de ideas, resultó más beneficioso el manejo de la acidez.

Mc Lean y Carbonell (1972) determinaron el efecto de algunas relaciones de saturación de bases intercambiables (Ca:Mg 75%:5% hasta 50%:25% para dos niveles de K) sobre la producción y el contenido de nutrientes en alfalfa y mijo. La producción de las especies cultivadas no se alteró por las variaciones de estas relaciones. El aumento de la saturación de Mg^{2+} se tradujo en un incremento en el contenido foliar de este elemento, con la subsecuente disminución de los niveles de K en la planta.

Jiménez (2006) estudió la dinámica y la disponibilidad de potasio en Andisoles e Inceptisoles dedicados al cultivo de la papa en el altiplano cundiboyacense (Colombia). Este autor no encontró respuesta en producción a los tratamientos ni las relaciones entre bases intercambiables.

1.5.3 Efecto de las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el cultivo del café

Henao et al. (1995) determinaron diferentes parámetros edáficos y la composición foliar de elementos nutritivos en café con el fin de estudiar la dinámica y disponibilidad de Mg^{2+} en suelos clasificados como Andisoles (unidad cartográfica Chinchiná) e Inceptisoles (unidad cartográfica 200) de la zona cafetera central colombiana. La unidad Chinchiná presentó un contenido alto de Mg total, pero una baja liberación de formas disponibles debido a que este se encuentra haciendo parte de la estructura de minerales poco alterados en las fracciones de limos y arenas. En la unidad 200, por el alto grado de evolución del suelo, presentó una mayor movilidad del Mg mineral hacia las formas lentas y rápidamente disponibles. La relación de actividad $\frac{\sqrt{a\text{Mg}}}{[a\text{K} + \sqrt{(a\text{Mg} + a\text{Ca})}]}$ en la solución del suelo fue el índice más altamente correlacionado con el Mg foliar ($r=0,82^{**}$), seguido por el porcentaje de saturación de Mg^{2+} con respecto de la CIC ($r=0,79^{**}$) y el Mg^{2+} intercambiable ($r=0,68^{**}$). A mayor contenido de K^+ se presentó una disminución del contenido de Mg foliar.

Cadena (1997) llevó a cabo un estudio de hidroponía para medir la absorción y translocación de Mg^{2+} en presencia de K^+ y Ca^{2+} en plantas de café variedad Colombia, mediante la simulación de tres concentraciones de Mg (12, 48 y 84 mg kg^{-1}), dos de K (40 y 428 mg kg^{-1}) y dos de Ca (40 y 360 mg kg^{-1}), bajo un diseño factorial $3 \times 2 \times 2$. Adicionalmente, se incluyó un “testigo absoluto” con las dosis medias de cada nutriente. La mayor producción de biomasa seca fue registrada cuando se empleó la dosis media. Con base en lo anterior el autor deduce como la mejor relación de Mg:K:Ca en soluciones nutritivas, la representada por 1:5:4. Sin embargo, queda la duda si la relación en referencia es también válida para la solución del suelo en los diferentes suelos en los que se cultiva el café, y la posibilidad de lograrla con las fuentes fertilizantes que presentan distintas solubilidades, como son las cales o sales solubles.

En una investigación dirigida hacia la determinación de los niveles críticos de nutrientes en café se registró un efecto significativo de la fertilización potásica en cafetales a libre exposición solar, cuando los contenidos de K^+ eran inferiores a 0,2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (reducciones en el rendimiento equivalentes al 40%); para contenidos entre 0,2 y 0,4 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ las disminuciones en la producción fueron inferiores al 14%, y para niveles mayores a 0,4 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ solo el 8% (Sadeghian, 2003). En esta investigación no se registró respuesta en producción a la aplicación de Mg; pese a ello sus niveles foliares se incrementaron significativamente cuando este elemento se incluyó de los planes de fertilización. Un efecto más importante en la absorción de Mg^{2+} se logró cuando no se aplicó K; lo cual confirma el hecho que en la toma del Mg^{2+} puede jugar un papel más importante en la fertilización potásica que el suministro mismo de Mg, aunque este comportamiento no se refleje en la producción.

Henao y Hernández (2002) evaluaron la disponibilidad de K^+ y su relación con la nutrición del café en la etapa de crecimiento vegetativo en tres unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia

(Chinchiná, Líbano y Timbío). Se logró explicar la variación del K foliar por los contenidos de K^+ intercambiable ($R^2=0,83$) y K^+ en la solución ($R^2=0,73$), mediante ecuaciones cuadráticas. La unidad Chinchiná mostró la más baja capacidad de restitución de este elemento. De acuerdo con lo anterior, el punto de inflexión del modelo hallado para K^+ intercambiable ($y=0,41+4,82x-2,75x^2$) corresponde a $0,88 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, valor que supera en más de dos veces el nivel crítico reportado por Bravo (1978) para café ($0,35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Cabe aclarar que este último valor fue obtenido mediante la correlación establecida entre el rendimiento relativo y el contenido de K^+ en el suelo, resultante de una investigación que se llevó a cabo durante cuatro años en diversas localidades de la zona cafetera de Colombia. Lo anterior puede generar cierta incertidumbre acerca de la verdadera relación entre los niveles foliares de K y la producción de café.

Con el fin de conocer el estado de disponibilidad de Mg^{2+} en la interfase suelo-raíces para café en función de la concentración de K y Ca, Cadena (2004) condujo una investigación en un Andisol clasificado como Acrudoxic Melanudands, ubicado en municipio de Chinchiná (Caldas). Para ello se aplicaron simultáneamente diferentes combinaciones de los tres nutrientes, empleando fuentes solubles. Los resultados indicaron una interacción entre estos iones en la interfase solución del suelo-complejo de cambio-raíces; lo cual se vio reflejado en la producción de café cereza, correspondiente a tres de los 15 ó 20 “pases” (recolecciones) que se realizan anualmente. En este sentido el tratamiento con dosis media de Mg ($64,0 \text{ g/árbol}$), baja de K ($30,6 \text{ g/árbol}$) y baja de Ca ($66,6 \text{ g/árbol}$), demostró ser el tratamiento más influyente en la selectividad y concentración en la superficie de la raíz de los iones Mg^{2+} , K^+ y Ca^{2+} ; así como en el rendimiento de la planta de café. Basado en lo anterior el autor sugiere como la mejor proporción de fertilización simple con las fuentes solubles $MgSO_4 \cdot H_2O + KCl + Ca(NO_3)_2 \cdot NH_4NO_3 \cdot 10H_2O$ la proporción 1,0Mg:1,7K:1,3Ca, la cual fue más eficaz cuando las concentraciones tendieron hacia las dosis bajas.

Bertsch et al. (1991) determinaron para dos cosechas la respuesta del cafeto en producción a la modificación de los cocientes de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en cuatro campos experimentales de Costa Rica. Para ello, luego de seleccionar las plantaciones con desbalances entre los cationes intercambiables (dos con desbalance Mg/K debido a bajos niveles de K^+ , y dos con desbalance Mg/K como consecuencia de bajos niveles de Mg^{2+}), se aplicaron cuatro tratamientos con el fin de modificar las relaciones. Para suelos con problemas de Mg^{2+} estos fueron 0, 50, 100 y 200% del valor de Mg/K, y para los suelos con problemas de potasio 0, 20, 40 y 60%. Los resultados de este trabajo no permitieron establecer de manera clara el efecto de las variaciones sobre la producción de café. Los autores sugieren mayor precaución con los criterios comúnmente difundidos acerca de las relaciones en mención al momento de calcular los requerimientos nutricionales.

En un trabajo realizado en invernadero, Tomaz et al. (2003) evaluaron la eficiencia de la absorción, translocación y uso de Ca^{2+} , Mg^{2+} y S en plantas de café injertadas (cuatro genotipos como injerto y cuatro como portainjerto). La eficiencia de la toma y el uso de Ca^{2+} , Mg^{2+} y S varió con la combinación, más no así para la eficiencia en la translocación, pues solamente Mg^{2+} y S presentaron efecto de este parámetro por la combinación de injerto/portainjerto. Lo anterior indicó variaciones en el comportamiento de Mg^{2+} frente al Ca^{2+} y S.

En un experimento, realizado bajo condiciones de invernadero, Oliveira et al. (1994) evaluaron el efecto de las variaciones en la saturación de cationes básicos en el crecimiento y la nutrición de plántulas de café en un suelo de carga variable. El crecimiento del café fue mayor al incrementar los valores de la CICE y el porcentaje de saturación de Mg^{2+} con respecto a la CICE. El Ca de las hojas

estuvo mejor correlacionado con la relación $\text{Log}_{10} \text{Ca/Mg}$ que con la relación Ca/Mg intercambiable. En el trabajo se sugiere tener en cuenta los nutrientes como una herramienta importante para la interpretación de los resultados de los análisis de suelo para el crecimiento del café en un suelo de carga variable.

Malavolta (2006) observó que la relación Ca:Mg , hasta 4,49:1, proporcionó una mayor producción de café, no así para relaciones mayores a 5:1; a su vez, Garcia (1981), estudiando relaciones de Ca:Mg para café en dos tipos de suelo, verificó que las relaciones 2,52:1 y 3,08:1 en el suelo fueron las más favorables para el desarrollo de las plantas.

A través de encalamiento, Corrêa et al. (2007) modificaron desde 30 hasta 70% la saturación de bases en un Latosol de Brasil con el fin de hallar un índice ideal para la nutrición de café en la etapa de producción. Con el incremento de la saturación de bases también aumentó la relación Ca:Mg ; comportamiento que fue explicado con el modelo $y = 1,44x - 24,25$ ($R^2 = 0,94^{**}$). De acuerdo con este modelo y los registros de producción los autores sugieren que la mejor relación se encuentra entre 2,52:1 y 3,08:1, y la saturación óptima corresponde a 55,1%. Cabe aclarar que en este trabajo no se contempló la idea que haya sido el efecto del incremento del pH el responsable del incremento en la producción.

1.6 Las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ como indicadores de su disponibilidad

1.6.1 Generalidades

Las relaciones entre las bases intercambiables pueden ser naturales o inducidas. De acuerdo con Mengel y Kirkby (1987), los suelos formados a partir de serpentinas tienen altas cantidades de Mg^{2+} , y por ende una baja relación de Ca/Mg en el complejo de cambio; pudiéndose presentar así deficiencias de Ca^{2+} en la vegetación. Las inducidas son el resultado del manejo que se da a las plantaciones, principalmente las causadas por la aplicación de fertilizantes, enmiendas y aguas de riego.

Havlin et al. (1999), refiriéndose a las relaciones entre cationes intercambiables, indican que cocientes de Ca/Mg mayores a 10/1–15/1 pueden causar deficiencias de Mg^{2+} , lo cual ocurre para algunos cultivos cuando se llevan a cabo prácticas de encalamiento. En cuanto a la relación de K/Mg , los autores citan los siguientes valores críticos: para cultivos de campo 5/1, para hortalizas y remolacha azucarera 3/1, y frutales y cultivos de invernadero 2/1. Otro ión que ejerce un efecto negativo sobre la toma de Mg^{2+} es el amonio (NH_4^+), bien sea por competencia directa o por la liberación de H^+ durante el proceso de nitrificación.

Navarro y Navarro (2003) sostienen que los antagonismos entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ no suelen presentarse cuando existe una debida proporción entre estos. Si las relaciones K/Mg y K/Ca son superiores a la unidad y la de Ca/Mg es superior a diez, es frecuente que aparezcan.

Según ICA (1992), es difícil establecer niveles críticos para Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ ; pues en la mayoría de los casos se debe considerar no sólo la fracción intercambiable, sino también el porcentaje de saturación en el complejo de cambio y el pH del suelo. Esta entidad asegura que “*uno de los problemas más comunes en los suelos colombianos es el de la relación Ca/Mg en el complejo coloidal*”; por lo tanto, recomienda tenerla presente, especialmente en los suelos ácidos que requieren de encalamiento; siendo el valor mínimo de esta relación igual a 1,0. Si el cociente entre estos dos elementos es amplio (más de 4), y se necesita encalar, se sugiere aplicar 1250 kg/ha de cal dolomítica por cada $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Al^{3+} . En este mismo sentido se consideran “normales” para condiciones de Colombia las siguientes relaciones entre Ca:Mg:K: 3:1:0,25. En la Tabla 1–1 se presenta una clasificación muy amplia para el contenido de las bases intercambiables a nivel nacional, sus concentraciones relativas y relaciones de acuerdo con el ICA.

Tabla 1–1. Estimativo conceptual de las bases en el suelo, según el ICA (1992).

Nivel	Calcio		Magnesio		Potasio	
	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	Saturación (%)	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	Saturación (%)	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	Saturación (%)
Alto	>6	>50	>2,5	>25	>0,4	>3
Medio	3–6	30–50	1,5–2,5	15–25	0,2–0,4	2–3
Bajo	<3	<30	<1,5	<15	<0,2	<2

En la Tabla 1–2 se incluyen relaciones que de acuerdo con Salamanca (1990) se consideran ideales para el desarrollo de las plantas en general.

Tabla 1–2. Clasificación general de relaciones ideales entre los cationes intercambiables.

Relación	Ideal	Deficiencias de K
Mg/K	3	Mayor de 18
Ca/K	6	Mayor de 30
(Ca+Mg)/K	10	Mayor de 40
Ca/Mg	2–4	

Estrada (2001) hace una síntesis de los niveles críticos y las relaciones ideales para Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el suelo, propuestas por diversos autores. En general se consideran como bajos los siguientes rangos:

- Contenido de Ca^{2+} intercambiable: 1,5–3,0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
- Porcentaje de saturación de Ca^{2+} : 15–30%
- Contenido de Mg^{2+} intercambiable: 0,4–1,5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
- Porcentaje de saturación de Mg^{2+} : 5–15%
- Relación Mg/K: 1

León (1994) hace un llamado de atención acerca de la dificultad para ajustar las relaciones entre los cationes intercambiables, especialmente en suelos ácidos de Colombia con baja CIC, en donde la saturación de bases tiene una relación directa con el pH del suelo. Sobre este tema el autor en referencia comenta que estas relaciones pregonadas no parecen ser la mejor solución, y que aparentemente los contenidos absolutos de los nutrientes serían el factor principal para determinar su disponibilidad, siendo posible que su relación con otros cationes afecte esa disponibilidad. De acuerdo con este autor, en general se puede decir que los contenidos muy altos de Ca^{2+} y Mg^{2+} disminuyen la absorción del K^+ y que los niveles elevados de K^+ pueden llegar a agravar la deficiencia de Mg^{2+} . Pese a lo expuesto se debe resaltar que las plantas tienen una capacidad de adaptación bastante grande y solo en condiciones de relaciones extremas serían afectadas en su crecimiento. León (1994) sugiere las siguientes reglas prácticas como guía: i) no se debe dejar que el contenido de potasio esté por encima del Mg^{2+} , ii) el mantener altos contenidos de Ca^{2+} ayuda a evitar las pérdidas de K^+ por lixiviación y reduce el consumo de lujo de K^+ .

1.6.2 Niveles y relaciones adecuados de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ propuestos para café

Valencia (1999), basándose en las diferentes investigaciones desarrolladas en Cenicafé, sugiere como adecuados los siguiente rangos y relaciones de Ca, Mg y K en el suelo para café en Colombia:

- K^+ ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$): $0,35 \pm 0,06$ ó más
- Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$): $2,1 \pm 0,5$ o más y menor de 4,2
- Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$): $0,7 \pm 0,2$ ó más
- K:Ca:Mg: 1:6:2

Carvajal (1984) tiene en cuenta las relaciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} frente a K^+ para ajustar los planes de fertilización. Dado el caso que la relación $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ sea mayor a 10 se incrementa la dosis de potasio.

Para condiciones de Kenya se ha propuesto tener en cuenta, además de los niveles de K^+ intercambiable, las relaciones de este nutriente con las demás bases intercambiables para definir los planes de fertilización en café (Coffee Research Foundation, 1990). Para ello se establece como límite de la relación $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ un valor igual a 10; cuando este cociente excede a dicho valor, se recomienda una fórmula con una relativa baja dosis de K, aunque sus niveles en el suelo sean altos (mayor de $0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). En Honduras se considera como un contenido normal para la nutrición de café $0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K^+ , adicionalmente su uso depende del cociente $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$. El suministro de Mg se realiza cuando el tenor en el suelo sea menor que $0,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y la relación Mg/K inferior a 2 (Palma, 1994). Chaves (2002) recomienda elevar la saturación de bases intercambiables a valores cercanos a 60–70% mediante el encalado. La relación ideal entre Ca:Mg es de 4,7.

2. Materiales y métodos

2.1 Localización y duración

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Nacional de Investigaciones de Café–CENICAFÉ, ubicado en el municipio de Chinchiná (departamento de Caldas), a 5°0' de latitud Norte, 75°36' longitud Oeste y una altitud de 1310 m, con temperatura media de 21,7 °C y precipitación anual de 3000 mm. De acuerdo con la clasificación de Holdridge, la zona de vida para el sitio del estudio corresponde a Bosque húmedo premontano (Bh-PM). La fase experimental tuvo una duración de 20 meses (mayo de 2008 a diciembre de 2009).

2.2 Metodología

El estudio se realizó en dos fases, de acuerdo con los objetivos propuestos. A continuación se describe la metodología para cada una de ellas.

2.2.1 Fase I. Selectividad por Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiable en algunas unidades de suelos de la zona cafetera colombiana

En esta fase se determinó el comportamiento de la retención selectiva de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ por la fase intercambiable en algunos suelos representativos de la zona cafetera colombiana contrastantes en su origen y mineralogía. Para ello se sometieron los suelos a soluciones con diferentes concentraciones de estos tres elementos, para luego evaluar su dinámica en condiciones de competencia por sitios de adsorción.

2.2.1.1 Selección de las unidades cartográficas de suelo

Con base en la información disponible en Cenicafé, se seleccionaron catorce unidades cartográficas de suelos, caracterizadas por su diversidad en origen, mineralogía y la cobertura en el área sembrada con café (Tabla 2–1).

2.2.1.2 Toma y análisis de las muestras de suelo

En cada unidad de suelo se seleccionó un lote de café a plena exposición solar, en donde se ubicaron cinco puntos de muestreo en un área aproximada de 100 m². En cada punto se recolectó un

kg de suelo a 25 cm de profundidad del horizonte A, con el fin de conformar una muestra compuesta. Cuando el espesor del horizonte A era inferior al valor en referencia, se tomaron como límite la profundidad de este horizonte.

Los suelos se secaron al aire durante 10 días; tiempo después del cual se homogeneizaron, se pasaron por tamiz de 2 mm y se realizó la siguiente caracterización de sus propiedades químicas en los laboratorios de Cenicafé, de acuerdo con las metodologías descritas por Carrillo (1985): pH (método potenciométrico–relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), carbono orgánico (Walkley–Black), N (método Semimicro Kjeldahl), CIC (Ac. Amonio 1,0 M, pH=7,0), P (extracción con Bray II), Ca, Mg, K y Na (extracción con Ac. amonio 1M a pH 7,0), Al (extracción con KCl 1,0 M), S (método turbimétrico, extracción con fosfato monocálcico 0,008 M), B (extracción con agua caliente), Fe, Mn, Zn y Cu (extracción con EDTA 0,01 M y Ac. Amonio 1,0 M). Se analizó la mineralogía de los suelos por difracción de rayos X en el respectivo laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Tabla 2–1. Información general sobre las unidades cartográficas del suelo preseleccionadas para la primera fase del estudio y su ubicación.

No.	Departamento	Municipio	Unidad de suelo	Origen	Material parental	Taxonomía*
1	Tolima	Líbano	Líbano	Volcánico	C. Volcánicas	Melanudands
2	Risaralda	Pereira	Chinchiná	Volcánico	C. Volcánicas	Melanudands
3	Caldas	Chinchiná	Chinchiná	Volcánico	C. Volcánicas	Fulvudands
4	Antioquia	Venecia	Chinchiná	Volcánico	C. Volcánicas	Melanudands
5	Cauca	Timbío	Timbío	Volcánico	C. Volcánicas	Melanudands
6	Tolima	Marquetalia	Fresno	Volcánico	C. Volcánicas	Fulvudands
7	Quindío	Quimbaya	Quindío	Volcánico	C. Volcánicas	Hapludands
8	Tolima	Ibagué	San Simón	Ígneo	Granito biotítico	Dystrudepts
9	Santander	Floridablanca	Paujíl	Metamórfico	Gneiss biotítico	Dystrudepts
10	Valle del Cauca	Jamundí	Doscientos	Ígneo	Basalto	Dystrudepts
11	Valle del Cauca	Sevilla	Doscientos	Ígneo	Basalto	Eutrodepts
12	Antioquia	Fredonia	Suroeste	Sedimentario	Aglomerados	Dystrudepts
13	Antioquia	Fredonia	Salgar	Metamórfico	Pizarra	Dystrudepts
14	Huila	Gigante	Guadalupe	Sedimentario	Arenisca	Dystrudepts

* A nivel de gran grupo (USDA).

2.2.1.3 Definición de los tratamientos y procedimiento analítico

Se determinó la selectividad de intercambio catiónico mediante la metodología descrita por Loyola y Pavan (1989), a la cual se realizaron algunas modificaciones, de acuerdo con las pruebas preliminares. Esta incluyó los siguientes pasos:

- El suelo seco se pasó por tamiz de 2 mm.
- Se saturó el suelo con Ca^{2+} con el fin de homogeneizar la fase intercambiable, así: se transfirieron 10 g de cada suelo a un tubo de polipropileno de 50 mL, se adicionaron 20 mL de una solución de CaCl_2 0,1 M, se agitó por una hora, se centrifugó a 2000 r.p.m. durante diez minutos y se descartó el sobrenadante. Se repitió esta operación por tres veces y se lavó el suelo con agua destilada (agitación y centrifugación) hasta remover por completo los cloruros, verificando con nitrato de plata (AgNO_3). El anterior procedimiento se llevó a cabo para 16 submuestras de cada suelo.
- Los suelos saturados con Ca^{2+} se sometieron a cuatro tratamientos (soluciones de intercambio), con diferentes fuerzas iónicas y concentraciones de Ca, Mg y K (Tabla 2–2), empleando como fuentes cloruros. La cantidad empleada de cada solución de intercambio por muestra de suelo fue de 25 mL y se utilizaron cuatro repeticiones por cada tratamiento.

Tabla 2–2. Composición de las soluciones de intercambio, aplicados como tratamientos.

Solución de intercambio (No.)	Fuerza iónica (mmol L ⁻¹)	Ca	Mg	K	Cl
		(mmol _c L ⁻¹)			
1	1,0	0,25	0,25	0,25	0,75
2	2,0	0,5	0,5	0,5	1,5
3	4,0	1,0	1,0	1,0	3,0
4	8,0	2,0	2,0	2,0	6,0

Las muestras de suelo se agitaron durante una h; posteriormente, y por centrifugación durante 10 minutos, se separó la solución de equilibrio de la fase sólida, para luego descartar el sobrenadante. Este procedimiento se repitió en cuatro oportunidades; en la última ocasión se guardó la solución de equilibrio y se determinaron en esta el pH (método potenciométrico) y la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ por espectrofotometría de absorción atómica. El contenido de cloruro se determinó por el método volumétrico (valoración con nitrato de plata).

- Se adicionaron 20 mL de $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 0,1 M para extraer los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) en la fase sólida y se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica. El cloruro (Cl^-) se determinó con el método volumétrico.
- Se calculó la actividad de los iones libres de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ en la solución de equilibrio, mediante el empleo del programa de computador SPECIES (Barak, 1990). Para alimentar el programa se ingresa la información correspondiente a la concentración de los cationes (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , etc.) y de aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{2-} , etc.); datos con los cuales se calcula mediante procedimientos matemáticos iterativos la hidrólisis de especies, la formación de pares iónicos, la fuerza iónica y la actividad del ión. La salida consiste en las actividades de los iones libres.

- Con los valores de las actividades de los iones en la solución de equilibrio y en el complejo de cambio se calcularon los coeficientes de selectividad para las reacciones de intercambio Ca–Mg, K–Ca y K–Mg, empleando la ecuación de Vanselow (Loyola y Pavan, 1989; Sposito, 2008).

$$K = \frac{(C_A^{a+})^{1/a} X_{1/b} B}{(C_B^{b+})^{1/b} X_{1/a} A}$$

donde:

K=Coeficiente de selectividad

X=Cationes intercambiables (cmol_c kg⁻¹)

C_A y C_B=Concentración de cationes solubles (mol L⁻¹)

a y b=Valencia de A y B respectivamente

Los coeficientes de selectividad para los tres posibles pares de cationes son:

$$K_1 = \frac{(Ca)^{1/2}}{(Mg)^{1/2}} * \frac{X_{1/2} Mg}{X_{1/2} Ca}; K_2 = \frac{(K)}{(Ca)^{1/2}} * \frac{X_{1/2} Ca}{XK}; K_3 = \frac{(K)}{(Mg)^{1/2}} * \frac{X_{1/2} Mg}{XK}$$

2.2.1.4 Manejo de la información y análisis estadístico

La información obtenida se digitalizó en hojas electrónicas con el fin de conformar una base de datos con la siguiente información: unidad cartográfica, procedencia del suelo, tratamiento (solución de intercambio), repetición, pH, contenidos de Cl⁻ y cationes intercambiables en el suelo, concentraciones de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Cl⁻ en la solución del equilibrio y coeficientes de selectividad.

2.2.1.5 Variable de respuesta

La variable de respuesta fue el coeficiente de selectividad de Vanselow para los intercambios iónicos Ca–Mg, K–Ca y K–Mg, obtenido para cada tratamiento.

2.2.1.6 Análisis estadístico

En esta fase, mediante el análisis estadístico, se buscó evaluar la siguiente hipótesis:

Para al menos una de las relaciones de intercambio Ca–Mg, K–Ca y K–Mg, el coeficiente de selectividad depende de la interacción unidad de suelo y concentración iónica de estos elementos en la solución del suelo.

Los datos fueron analizados mediante el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System), versión 9,2 de 2009. Para cada unidad de suelo y tratamiento se estimaron los promedios y las desviaciones estándar de la variable de respuesta (coeficiente de selectividad de cada par iónico, es decir Ca–Mg, K–Ca y K–Mg).

Puesto que el análisis de varianza, realizada mediante el procedimiento PROC GLM, indicó efecto de la interacción Concentración iónica x Unidad de suelo para los tres coeficientes de selectividad, se evaluó en cada unidad de suelo la tendencia lineal, cuadrática y cúbica de la variable de respuesta con respecto a las concentraciones iónicas, corroborando en cada caso la significancia de los coeficientes de regresión. Posteriormente, se compararon las pendientes para aquellas unidades de suelo en las cuales el comportamiento de la respuesta era lineal, empleando la prueba Tukey ($P \leq 0,05$). En este mismo sentido, se procedió a comparar las pendientes y las curvaturas en las unidades de suelo en las que la tendencia era de tipo cuadrático. Con base en lo anterior se agruparon los suelos y se determinó una pendiente común para cada grupo. Las variaciones en los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiable fueron explicadas en función de las concentraciones iónicas aplicadas.

Una vez definido lo anterior se procedió a seleccionar tres de los catorce suelos evaluados, procurando que fueran disímiles en su comportamiento de selectividad catiónica para los elementos objeto de estudio; es decir, con diferentes energías para retener el Ca^{2+} , Mg^{2+} , y K^+ . Para ello se tuvieron en cuenta tanto los promedios de los coeficientes de selectividad obtenidos en los cuatro tratamientos aplicados, como las tendencias (funciones) de los cambios en los valores de dichos coeficientes en función de la fuerza iónica de la solución de intercambio.

2.2.2 Fase II. Efecto de las variaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre la nutrición y el crecimiento de café

En esta fase se emplearon los tres suelos seleccionados en la fase I, con el fin de evaluar el efecto de las modificaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el complejo de cambio y en la solución del suelo sobre la nutrición y el crecimiento del café en la etapa de almácigo.

Se procedió a recolectar cantidades suficientes de suelo (aproximadamente 1 m^3) a 25 cm de profundidad en los mismos sitios en los que se obtuvieron las muestras de la fase I. El suelo recolectado se transportó hasta las instalaciones de la granja de Cenicafé en Chinchiná, en donde se pasó por zaranda de 10 mm y se homogeneizó.

2.2.2.1 Tratamientos y diseño experimental

En cada suelo se evaluaron 27 tratamientos, resultantes de tres dosis de Ca (0, 1 y 3 g dm⁻³ de suelo) en combinación con tres dosis de Mg (0, 1 y 3 g dm⁻³ de suelo) y tres dosis de K (0, 1 y 3 g dm⁻³ de suelo), empleando como fuentes de fertilizantes sulfato de calcio –CaSO₄.2H₂O– (28% de CaO y S=18%), Sulfato de magnesio –MgSO₄.7H₂O– (16,4% de MgO y 13% de S), y sulfato de potasio –K₂SO₄– (50% de K₂O y 18% de S). Las dosis de los elementos se definieron con base en el volumen del suelo y no el peso éste, dadas las diferencias entre los valores de la densidad aparente de las unidades cartográficas (entre 0,54 y 0,96 g cm⁻³).

Para definir las anteriores dosis se tuvieron en cuenta los resultados de las investigaciones desarrolladas en Colombia por Arias (2008), Díaz (2006) y Salazar (1977); además de las actuales recomendaciones para el manejo de la nutrición de los cafetales (Chaves, 2002; Sadeghian 2008).

Una vez incorporados los fertilizantes al suelo en cada tratamiento, se procedió a llenar con la mezcla resultante las bolsas plásticas de 17 cm x 23 cm (aproximadamente 2 dm³), que se utilizan para la siembra de las plántulas de café en la etapa de almácigo. Posteriormente los suelos fueron incubados durante 20 días con el contenido de humedad a capacidad de campo. Transcurrido este tiempo, se transplantó en cada bolsa una plántula de café variedad Caturra, cuyas semillas habían sido germinadas en arena lavada de río y desinfectada. El periodo comprendido entre la siembra de las semillas y la obtención de las plántulas fue de aproximadamente dos meses.

Una vez establecido el almácigo, las plantas de café recibieron un manejo agronómico, siguiendo las recomendaciones de la Federación Nacional de Cafeteros para esta etapa fenológica del cultivo, concerniente a control de arvenses, riego, sombra y manejo fitosanitario.

Las bolsas con las plántulas se ubicaron en una casa de malla y se distribuyeron por cada unidad de suelo de manera completamente aleatoria. Dos meses después del transplante cada planta recibió 2 g de P₂O₅ en forma de fosfato diamónico, de acuerdo con Salazar (2000).

El diseño experimental fue completamente al azar en arreglo factorial de 3³, y cada tratamiento contó con 10 repeticiones; por lo tanto se tuvieron 810 unidades experimentales, resultantes de 27 tratamientos x 3 unidades de suelo x 10 repeticiones. Para fines de análisis, se tomó a cada plántula contenida en una bolsa como unidad experimental.

2.2.2.2. Evaluación de los parámetros biológicos

Seis meses después de la siembra, las plantas fueron cosechadas y se separaron en raíces, tallos y hojas. Las raíces se lavaron previamente y luego, junto a los tallos y hojas, se secaron durante 72 horas en estufa a 65 °C para determinar el peso seco. Se seleccionaron de manera aleatoria cuatro de las diez plantas de cada tratamiento con el fin de analizar en cada una la concentración de Ca, Mg y K, mediante la metodología descrita por Carrillo (1994).

2.2.2.3 Evaluación de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo

Cinco meses después de la siembra de las plántulas se analizará la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo mediante cromatografía líquida. Para extraer la solución se instalaron microlisímetros Soil Rhizon Moisture Sampler (Eijkelkamp) en las mismas cuatro repeticiones en las que se determinará la composición elemental de los nutrientes (Anexo A). El microlisímetro consiste de una sonda de 10 cm de longitud con microporos que permite tomar una muestra de la solución del suelo bajo condiciones insaturadas, mediante la ayuda de una jeringa. Los resultados de este análisis se tomó como el Factor Intensidad (Barber, 1995).

Adicionalmente, en la solución del suelo se determinaron las concentraciones de cloruros, sulfatos y nitratos, pH y conductividad eléctrica. Estas variables fueron utilizadas para calcular las actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo mediante el programa SPECIES (Barak, 1992).

2.2.2.4 Evaluación de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable del suelo

Al momento de extraer las plantas del suelo, es decir seis meses después de la siembra, se tomaron muestras de suelo de las mismas cuatro bolsas en las que se instalaron los microlisímetros, con el fin de analizar los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Al^{3+} intercambiables. Para las determinaciones analíticas se utilizó la metodología ya descrita (sección 2.2.1.2). Los resultados de este análisis se tomó como el Factor Cantidad (Barber, 1995).

2.2.2.5 Variable de respuesta

Para determinar el efecto de los tratamientos se utilizó como variable de respuesta el peso seco total de las plantas a los seis meses después de transplante.

2.2.2.6 Variables complementarias

Se evaluaron las siguientes variables complementarias con el fin de que ayudaran a la comprensión del efecto de los tratamientos:

- Peso seco de raíces, de tallo y de la parte aérea
- Las relaciones Ca/Mg , Ca/K , Mg/K y $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ de la fase intercambiable y en la solución del suelo
- La saturación de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ con respecto a CICE expresada como porcentaje

- Concentración de Ca, Mg y K en raíces, tallo y parte aérea
- Contenido de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo

2.2.2.7 Análisis estadístico de los resultados

En esta fase, mediante el análisis estadístico, se buscó evaluar la siguiente hipótesis:

Los cambios en las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo, afectan la nutrición y el crecimiento de café en la etapa de almácigo.

Para cada unidad de suelo y tratamiento se estimaron el promedio y la desviación estándar tanto para la variable de respuesta como para las complementarias. Antes de realizar el análisis de varianza, se llevó a cabo la prueba de Chi cuadrado con un nivel de confianza del 99% para evaluar la homogeneidad de las varianzas de las unidades de suelos –como fuente de variación–. Esta prueba fue significativa, indicando así que las varianzas no fueron homogéneas, y que por lo tanto se debería analizar cada unidad de suelo por separado y no en forma combinada.

Para cada unidad de suelo se hizo un análisis de varianza bajo el modelo del diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 3^3 , con las variables de respuesta, con un nivel de confianza del 95%. Cuando el análisis de varianza no mostró efecto de las interacciones dobles y simples, pero si de los elementos por separado, se evaluó para cada uno de ellos la tendencia lineal y cuadrática. Cuando el análisis de varianza indicó efecto de la interacción se aplicó la prueba de contrastes ($P \leq 0,05$) con el fin de seleccionar la mejor combinación (mayor peso seco), elemento x dosis.

3. Resultados y discusión

De acuerdo con los objetivos propuestos y la metodología desarrollada, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las dos fases del estudio.

3.1 Fase I. Selectividad por Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables en algunas unidades de suelos de la zona cafetera colombiana

3.1.1 Propiedades de los suelos

En la Tabla 3–1 se presenta la información correspondiente a las propiedades químicas de los suelos objeto de estudio, la distribución del tamaño de las partículas (A, L y Ar) y la clasificación textural. Así mismo, en el anexo B se detalla la información acerca de la composición de los minerales cristalinos.

Se presentó una alta variación de las propiedades evaluadas, comportamiento que dio cumplimiento al propósito de seleccionar unidades cartográficas contrastantes. En general, los suelos derivados de cenizas volcánicas, como era de esperarse, exhibieron mayores contenidos de carbono orgánico (CO) y N total, mientras que sus niveles de P, Fe y Mn fueron los más bajos; siendo la unidad Chinchiná en el municipio de Chinchiná la excepción para el P. Una acumulación más alta de CO en los suelos con influencia de cenizas, se relaciona con su mayor resistencia a la mineralización; esto en respuesta a la presencia de la alófana como mineral predominante (Henaó, 2001; Zech et al., 1997). Lo anterior, como se discutirá más adelante, tiene implicaciones sobre la CIC; propiedad que ejerce influencia directa en la dinámica de los cationes en el suelo.

En cuanto a los cationes intercambiables se refiere, se presentó el siguiente orden en todas las unidades analizadas, sin que hubiera una tendencia que permitiera relacionar su contenido con respecto al origen de los suelos: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. El orden registrado sigue la serie liotrópica que indica la preferencia general de los suelos (Bohn et al., 2001; Sparks, 2003).

Henaó (2002), quien trabajó con diversos suelos de la zona cafetera de Colombia, también reporta al Ca^{2+} como catión predominante en la zona objeto de estudio, en tanto que los contenidos de Mg^{2+} no siempre fueron mayores que los de K^+ ; con respecto al Na^+ , su concentración estuvo por debajo de $0,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Las unidades Timbío y Paujil se caracterizaron por su mayor contenido de cationes (mayor de $7,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$); San Simón, Salgar, Doscientos en Sevilla, Quindío, Líbano y Chinchiná en Pereira presentaron valores intermedios (entre $2,5$ y $5,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), y las demás exhibieron contenidos inferiores a $2,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Tabla 3–1. Propiedades químicas y físicas de los suelos utilizados en el estudio.

No.	Unidad de suelo – Procedencia	pH	CO	N	P	S	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Ar	L	A	Textura
1	Líbano	5,1	10,4	0,62	11	7,6	2,0	0,59	0,20	0,03	1,2	178	9	21	12	0,44	26	30	43	F
2	Chinchiná – Pereira	5,0	6,6	0,45	9	8,8	1,9	0,41	0,26	0,03	1,2	108	20	9	2	0,33	20	28	51	F
3	Chinchiná – Chinchiná	4,8	7,3	0,48	117	21,6	0,6	0,25	0,15	0,09	1,6	227	18	3	13	0,44	36	33	31	FAr
4	Chinchiná – Venecia	4,7	10,2	0,62	8	13,7	0,5	0,21	0,18	0,01	2,8	119	15	4	1	0,21	22	33	45	F
5	Timbío	5,5	13,2	0,72	4	6,2	6,4	2,17	0,64	0,08	0,5	191	17	9	3	0,39	16	21	63	FA
6	Fresno	5,5	10,7	0,64	4	1,7	0,6	0,14	0,13	0,05	0,7	92	2	3	2	0,16	18	30	52	F
7	Quindío	5,3	3,5	0,26	45	0,7	2,3	0,38	0,23	0,02	0,8	144	11	4	1	0,36	18	15	67	FA
8	San Simón	5,4	2,6	0,20	43	5,0	3,9	1,39	0,19	0,09	0,2	278	56	5	12	0,50	36	15	49	ArA
9	Paujíl	5,4	4,8	0,34	38	12,5	5,3	0,93	0,92	0,03	0,4	389	10	3	1	0,58	52	23	25	Ar
10	Doscientos – Jamundí	4,9	8,0	0,52	2	23,5	0,2	0,16	0,10	0,01	1,2	164	7	2	4	0,61	42	19	39	Ar
11	Doscientos – Sevilla	4,6	2,5	0,20	36	7,7	2,4	1,62	0,47	0,10	2,8	307	40	5	13	0,38	44	23	33	Ar
12	Suroeste	4,4	5,9	0,41	37	9,4	0,7	0,24	0,61	0,01	7,8	367	63	7	3	0,66	38	15	47	ArA
13	Salgar	4,7	7,7	0,50	128	1,9	2,9	0,67	0,62	0,02	2,0	356	32	3	4	0,52	24	17	59	FArA
14	Guadalupe	4,7	2,6	0,21	129	4,8	0,8	0,24	0,38	0,01	1,5	537	99	4	4	0,59	18	30	52	F

A: Arena, L: Limo, Ar: Arcilla.

En siete de los suelos el pH fue bajo para café (menor de 5,0), como lo indica Valencia (1999), y se encontró una relación inversa entre esta variable y los contenidos de Al^{3+} (Figura 3–1), cuyo valor más elevado se encontró en la unidad Suroeste ($7,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). De acuerdo con un estudio realizado por Sadeghian (2003) en 27 localidades de la zona cafetera del país, la concentración de Al^{3+} se reduce conforme al aumento del pH hasta llegar a niveles inferiores a $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para valores superiores a 5,0. Havlin et al. (1999) y Zapata (2004) reportan un comportamiento similar; estos autores aseguran que para valores de pH superiores a 5,0–5,5 se corrigen los problemas de la acidez ocasionados por el Al^{3+} . El Mg^{2+} se incrementó conforme a los aumentos del Ca^{2+} ; sin embargo, no hubo una relación muy clara entre estos elementos y el K^+ o el Na^+ (Figura 3–1). El anterior comportamiento, además de sugerir una selectividad natural para el Ca^{2+} , Mg^{2+} y Al^{3+} en todos los suelos estudiados, indica que en general la dinámica de estos elementos está gobernada por los mismos factores, no necesariamente así para K^+ y Na^+ .

En la Tabla 3–2 se consignan los valores de la CIC, CICE ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+}$), las relaciones entre los cationes intercambiables y el porcentaje de CICE con respecto a la CIC de los suelos evaluados. En el ámbito general, los valores más altos de la CIC correspondieron a los suelos derivados de cenizas volcánicas, caracterizados por su alto porcentaje de CO y la presencia de alófana, y los valores más bajos a suelos cuyo origen era diferente a cenizas. La relación entre estas dos propiedades se presenta en la Figura 3–2, e indica una correlación estrecha de tipo lineal.

Tabla 3–2. Valores de CIC, CICE, relaciones entre cationes intercambiables y porcentaje de saturación de cationes con respecto a la CIC.

No.	Unidad de suelo – Procedencia	CIC	CICE	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Sat. Cat.*
		– ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) –						(%)
1	Líbano	32	4,02	3,39	10,00	2,95	12,95	12,56
2	Chinchiná – Pereira	28	3,80	4,63	7,31	1,58	8,88	13,57
3	Chinchiná – Chinchiná	25	2,69	2,40	4,00	1,67	5,67	10,76
4	Chinchiná – Venecia	40	3,70	2,38	2,78	1,17	3,94	9,25
5	Timbío	36	9,79	2,95	10,00	3,39	13,39	27,19
6	Fresno	30	1,62	4,29	4,62	1,08	5,69	5,40
7	Quindío	17	3,73	6,05	10,00	1,65	11,65	21,94
8	San Simón	12	5,77	2,81	20,53	7,32	27,84	48,08
9	Paujíl	19	7,58	5,70	5,76	1,01	6,77	39,89
10	Doscientos – Jamundí	26	1,67	1,25	2,00	1,60	3,60	6,42
11	Doscientos – Sevilla	21	7,39	1,48	5,11	3,45	8,55	35,19
12	Suroeste	30	9,36	2,92	1,15	0,39	1,54	31,20
13	Salgar	22	6,21	4,33	4,68	1,08	5,76	28,23
14	Guadalupe	11	2,93	3,33	2,11	0,63	2,74	26,64

* Saturación de cationes intercambiables ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+}$) con respecto a la CIC.

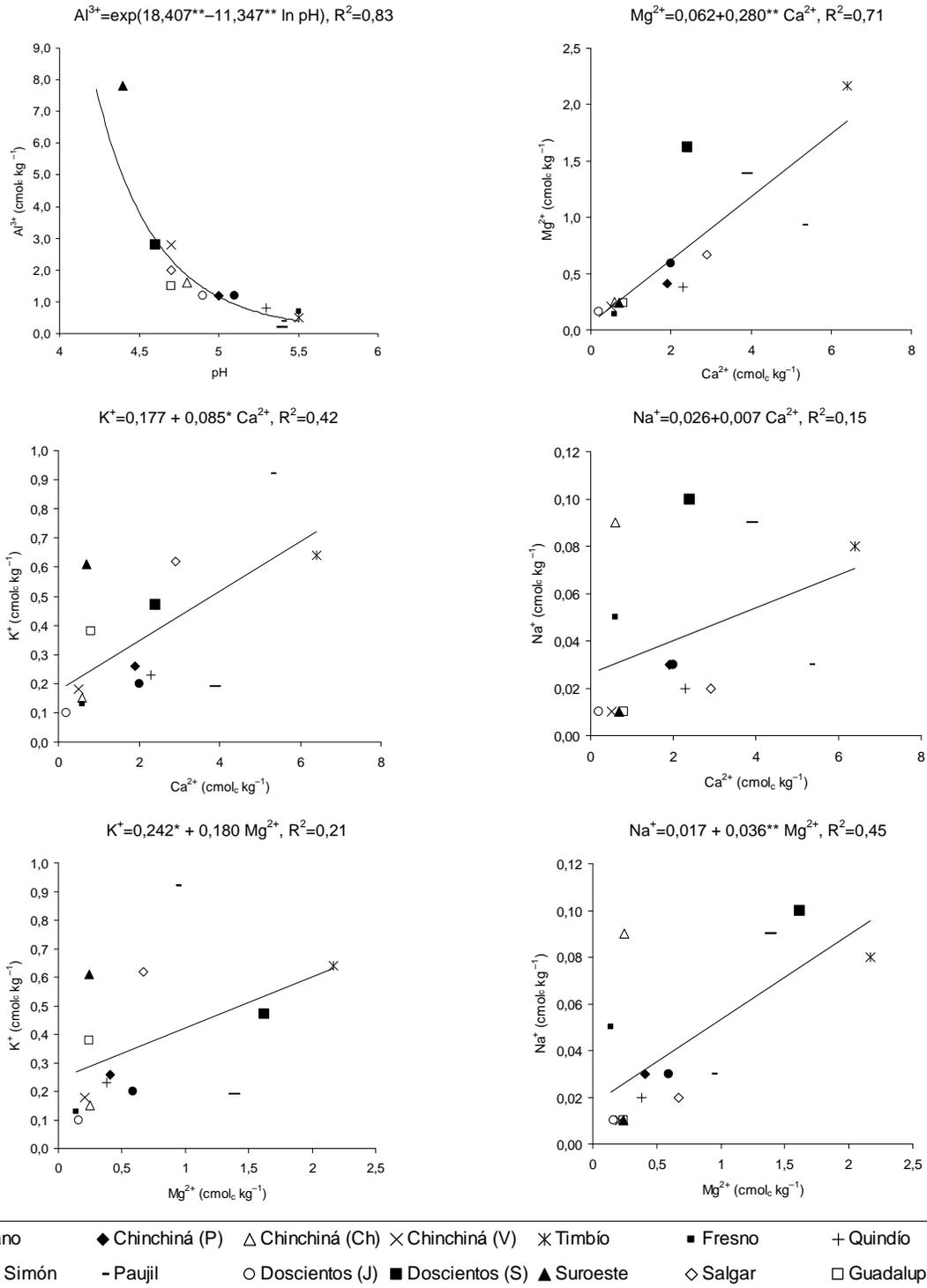


Figura 3–1. Relación entre pH y los cationes de cambio en las unidades de suelos evaluadas.

En los suelos ricos en humus, como los estudiados, hay una contribución significativa de los grupos carboxílicos a la CIC, la cual según Shoji et al. (1993), representa en promedio una mol de carga negativa por cada 40 moles de CO. De acuerdo con la ecuación obtenida (Figura 3–2), por cada unidad porcentual de CO, la CIC se incrementa en 2,15 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

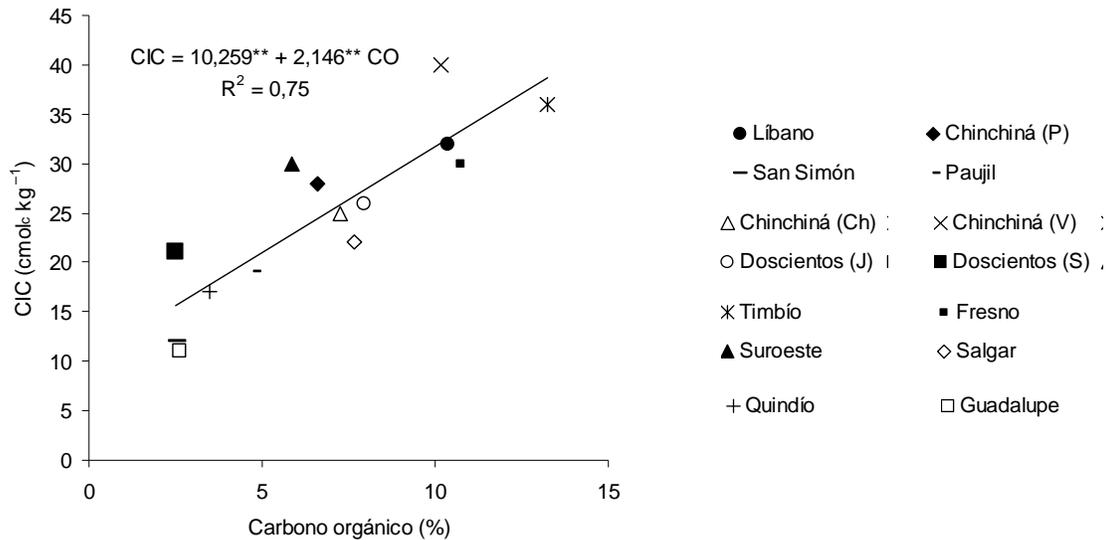


Figura 3–2. Variaciones de CIC con relación a los contenidos del carbono orgánico (CO) en los suelos evaluados.

Cabe aclarar que los valores hallados de CIC no necesariamente representan las condiciones “naturales”, pues en suelos de carga variable, como los empleados en este trabajo, la metodología empleada para determinar esta propiedad (Ac. Amonio 1,0 M a $\text{pH}=7,0$), conduce a elevar los valores de esta propiedad, como consecuencia del aumento del pH. De acuerdo con Bohn et al. (2001), la carga negativa del humus, y por ende su CIC, se debe a la disociación del H^+ de los grupos funcionales que depende en su totalidad fuertemente del pH; los ácidos fúlvicos y húmicos se comportan como polielectrolitos ácidos débiles. Debido a lo anterior en suelos de carga variable la CIC efectiva (CICE) es frecuentemente menor que la teóricamente posible (determinada con Ac. Amonio a $\text{pH}=7,0$) (Silva y Mendoza, 2007).

Una consecuencia de lo anterior se observa en la poca o nula relación que se halló entre CO y CICE, y entre CICE y CIC (Figura 3–3). Henao (2002) tampoco encontró relación entre estas últimas dos variables cuando las analizó en suelos de la región cafetera. Essington (2004) resalta que la CIC de un suelo a menudo se refiere a la máxima carga negativa potencial del coloide a $\text{pH} 7,0$. Posiblemente la falta de correlación entre estas variables tenga su origen en la diversidad de los suelos en este estudio, pues en una investigación desarrollada por Ciotta et al. (2003) en un Latosol de Brasil con diferentes sistemas de uso, se encontró relación directa tanto entre CO y CIC a $\text{pH}=7,0$ como entre CO y CICE, siendo cerca de tres veces mayores los valores obtenidos CIC frente a CICE.

El suelo proveniente de la unidad San Simón se caracterizó por las relaciones más amplias de Ca^{2+} y Mg^{2+} frente al K^+ , comportamiento que tiene su origen tanto en el bajo contenido de K^+ ($0,19 \text{ cmol}_c$

kg^{-1}), como los relativamente altos niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} ($3,9$ y $1,39 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). En contraposición a lo anterior, la unidad Suroeste presentó las relaciones más estrechas entre Ca/K y Mg/K , como consecuencia de un elevado K^+ intercambiable. La representación de la CICE con respecto a la CIC exhibió un rango amplio (entre $5,4$ en la unidad Fresno y $48,1$ en San Simón); sin embargo, los valores de esta variable fueron bajos para la mayoría de los suelos, de acuerdo con lo establecido por el ICA (1992). En general se puede afirmar que los suelos evaluados fueron disímiles en las relaciones objeto de estudio.

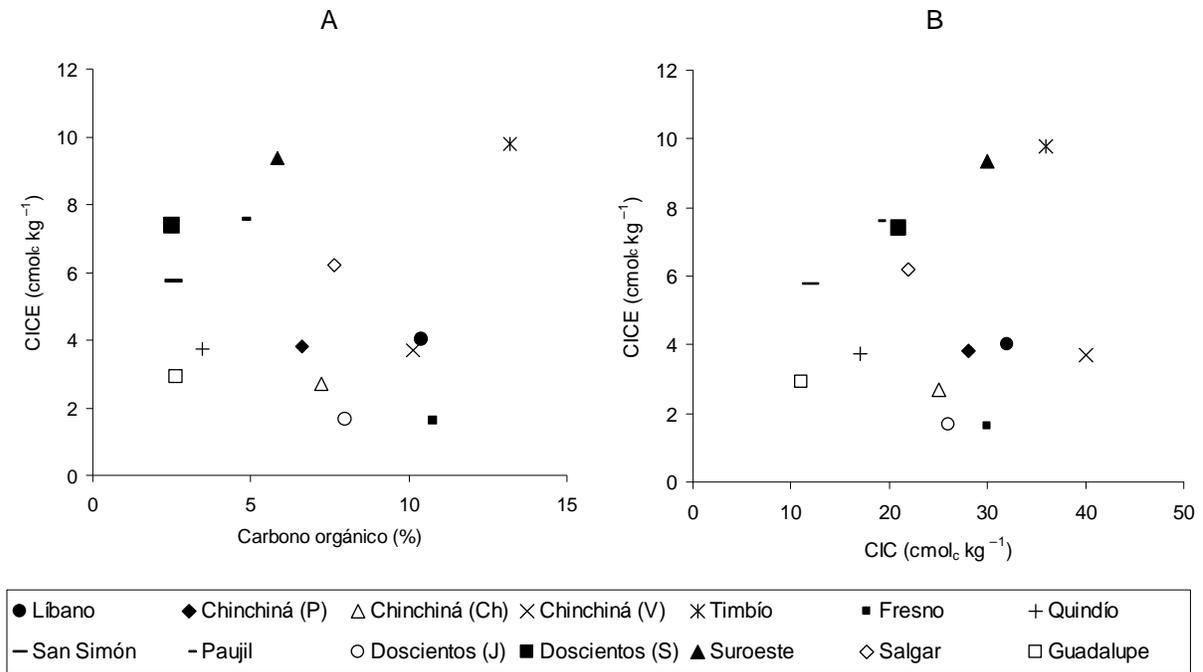


Figura 3-3. Cambios de CICE en función del carbono orgánico (A) y CIC (B).

Además del pH y el contenido de CO las propiedades que más han sido relacionadas con la capacidad para retener los cationes intercambiables son la textura y la mineralogía del suelo (Havlin et al., 1999). En cuanto a la textura y el aporte de las arcillas a la capacidad de cambio, sólo se pudo explicar las variaciones cuando los suelos se agruparon por su contenido de CO (Figura 3-4); en este sentido, para suelos con $\text{CO} < 5\%$ se presentó una alta correlación lineal entre el contenido de arcillas y la CICE. En contraposición a lo anterior, no se registró relación alguna entre arcillas y CIC, aun cuando se realizó la agrupación por CO (Figura 3-5). De acuerdo con la información suministrada por Batjes (1995), existe una relación estrecha entre el contenido de las arcillas y la CIC, siempre y cuando los contenidos de la materia orgánica no excedan el 2%. Helling et al. (1964) midieron la contribución de la materia orgánica y de la arcilla a la CIC en 60 suelos de Wisconsin (EUA), como respuesta a los cambios del pH (2,5, 3,5, 5,0, 6,0, 7,0 y 8,0). En este estudio el promedio de la CIC de la materia orgánica para los anteriores valores del pH (36, 73, 127, 131, 163 y $213 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente), fue mayor que la de la arcilla (38, 46, 54, 56, 60 y $64 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente).

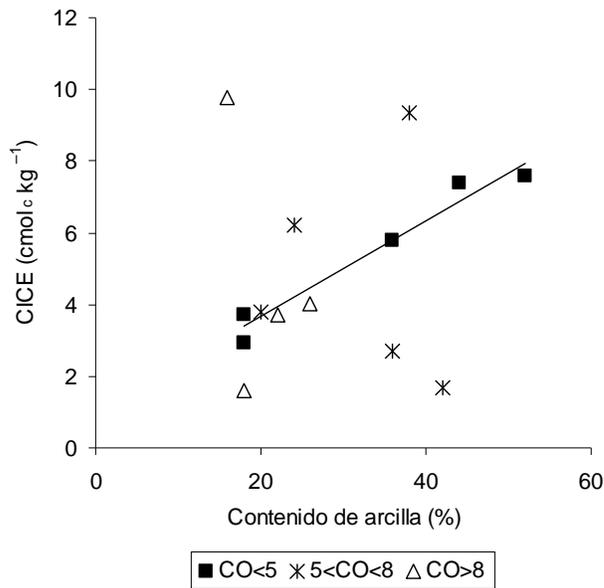


Figura 3-4. Relación entre el contenido de arcilla y la CICE ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+} + \text{Al}^{3+}$) en los suelos evaluados. La línea continua corresponde al modelo de regresión para $\text{CO} < 5,0$ ($y = 0,962 + 0,135x$, $R^2 = 0,96$).

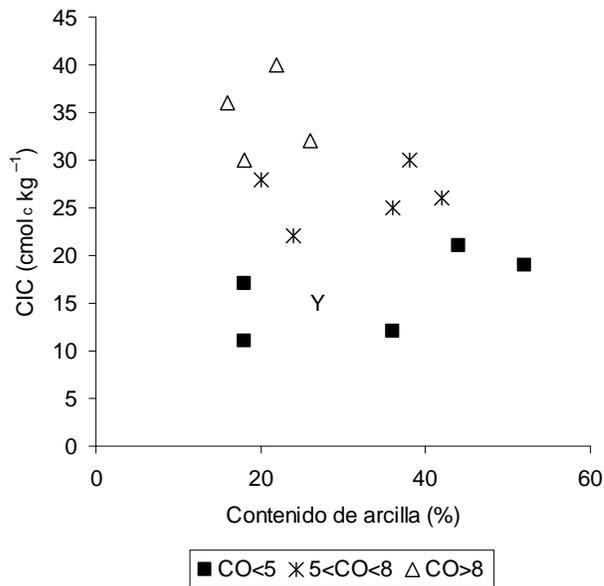


Figura 3-5. Relación entre el contenido de arcilla y la CIC en los suelos evaluados.

En cuanto al material parental de los suelos o la composición de los minerales cristalinos se refiere, en general no hubo evidencias que pudieran relacionarlos de manera clara con el contenido de los cationes intercambiables. Como era de esperarse, en los suelos derivados de cenizas volcánicas la influencia de la mineralogía sobre los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables fue poca, dado que el comportamiento de éstos está gobernado básicamente por su predominancia en arcillas no cristalinas como la alófana y la imogolita, además de la influencia de otros factores de formación, principalmente la precipitación (Dahlgren et al., 1993).

Los minerales cristalinos más frecuentes fueron cuarzo y albita; sin embargo, por ser estos de carácter “cosmopolita” y no hacer aportes significativos de nutrientes, en principio no ejercen influencia directa en los elementos objeto de estudio. Se pudieron identificar algunas relaciones; entre ellas, la abundancia de anortita en las unidades Timbío y San Simón, y el alto contenido de Ca^{2+} intercambiable, pues de acuerdo con (Havlin et al., 1999), la anortita constituye una de las principales fuentes de este elemento. Minerales como anfíboles en la unidad Quindío han sido referenciados con una alta disponibilidad de K^+ (Henao, 2002), y se espera que de alguna manera la presencia de ortoclasa en la unidad Guadalupe y de microclina en San Simón y Paujíl hayan contribuido en el aporte de K^+ , así mismo los contenidos de indialita en Timbío y cordierita en Líbano, Chinchiná–Pereira y Fresno hayan favorecido a los niveles de Mg^{2+} .

En resumen se pueden destacar los siguientes aspectos: i) pese a las diferencias registradas en las propiedades evaluadas, en los 14 suelos se encontró el siguiente orden “natural” en los contenidos de las bases intercambiables, independientes del origen y la mineralogía: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$; ii) el contenido de Al^{3+} disminuyó con el incremento del pH del suelo, hasta alcanzar valores menores a $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ cuando el pH era mayor de 5,1; iii) se encontró una correlación positiva y estrecha entre los valores de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables, más no entre éstos y el K^+ o el Na^+ ; comportamiento que además de sugerir una selectividad natural por el Ca^{2+} y Mg^{2+} , indica que en general la dinámica de la adsorción de estos elementos está gobernada por los mismos factores, iv) la CIC potencial, determinada con Acetato de amonio 1,0 M a $\text{pH}=7,0$, presentó una alta dependencia con respecto al contenido del CO, más no fue una medida de la capacidad real del suelo para retener los cationes de cambio, v) en suelos con más bajos niveles de CO (<5%), la fracción arcilla mostró ser un buen reservorio para la retención de los cationes intercambiables; sin embargo, no se halló relación alguna entre esta variable y la CIC, vi) sólo para algunas unidades de suelos se pudo establecer cierta relación entre la mineralogía de los suelos y el contenido de bases intercambiables.

3.1.2 Efecto de las soluciones de intercambio

En la Tabla 3–3 se presentan los promedios de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables, así como la suma de estas bases (SB), obtenidos para los 14 suelos en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio. En todos los suelos, el Ca^{2+} se caracterizó por ser el catión predominante, seguido por el Mg^{2+} y K^+ , respuesta que confirma la secuencia de la afinidad encontrada en condiciones de campo para los sitios de intercambio. En promedio, se registró el siguiente orden para la suma de los tres elementos evaluados: Paujíl > Timbío > San Simón > Doscientos–Sevilla > Salgar > Líbano > Suroeste > Quindío > Chinchiná–Pereira > Guadalupe > Chinchiná–Chinchiná > Chinchiná–Venecia > Fresno > Doscientos–Jamundí.

Tabla 3-3. Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables y la suma de éstas bases (SB) en respuesta a los tratamientos de soluciones de intercambio con igual proporción de Ca, Mg y K (1:1:1).

Solución de intercambio (No.)	Ca		Mg		K		SB	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(cmol _c kg ⁻¹)								
Chinchiná – Pereira								
1	3,65	0,07	0,15	0,00	0,08	0,00	3,88	0,07
2	3,52	0,26	0,26	0,01	0,12	0,00	3,90	0,26
3	3,49	0,36	0,38	0,01	0,19	0,01	4,06	0,36
4	2,78	0,50	0,46	0,04	0,23	0,01	3,47	0,55
Fresno								
1	1,80	0,14	0,13	0,00	0,02	0,01	1,95	0,13
2	1,73	0,20	0,19	0,01	0,04	0,00	1,96	0,20
3	1,84	0,21	0,24	0,01	0,05	0,00	2,14	0,22
4	1,76	0,26	0,31	0,02	0,04	0,02	2,11	0,26
Guadalupe								
1	2,35	0,14	0,16	0,00	0,06	0,01	2,58	0,14
2	2,18	0,15	0,27	0,01	0,10	0,00	2,56	0,13
3	2,12	0,22	0,38	0,03	0,15	0,00	2,66	0,25
4	1,77	0,15	0,48	0,03	0,20	0,01	2,45	0,17
Doscientos – Jamundí								
1	1,29	0,09	0,13	0,01	0,04	0,01	1,47	0,09
2	1,21	0,11	0,21	0,01	0,07	0,00	1,49	0,11
3	1,19	0,16	0,29	0,01	0,10	0,01	1,58	0,17
4	1,10	0,23	0,33	0,04	0,12	0,01	1,55	0,27
Líbano								
1	4,96	0,14	0,17	0,01	0,05	0,01	5,18	0,13
2	4,80	0,51	0,29	0,00	0,07	0,00	5,16	0,51
3	4,84	0,46	0,44	0,02	0,10	0,02	5,39	0,47
4	4,21	0,48	0,59	0,04	0,13	0,01	4,94	0,52
Quindío								
1	4,31	0,08	0,17	0,00	0,08	0,01	4,56	0,09
2	4,28	0,41	0,30	0,01	0,13	0,00	4,71	0,40
3	4,09	0,51	0,44	0,02	0,21	0,01	4,74	0,52
4	3,42	0,54	0,56	0,07	0,26	0,01	4,23	0,60
Chinchiná – Chinchiná								
1	2,13	0,09	0,14	0,00	0,04	0,00	2,31	0,09
2	2,04	0,24	0,22	0,01	0,05	0,00	2,32	0,24
3	2,05	0,19	0,31	0,04	0,08	0,01	2,43	0,19
4	1,73	0,43	0,33	0,07	0,08	0,01	2,13	0,49

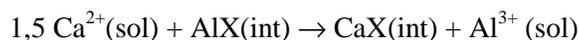
Continuación Tabla 3-3. Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables y la suma de éstas bases (SB) en respuesta a los tratamientos de soluciones de intercambio con igual proporción de Ca, Mg y K (1:1:1).

Solución de intercambio (No.)	Ca		Mg		K		SB	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(cmol _c kg ⁻¹)								
Paujíl								
1	14,27	1,22	0,19	0,01	0,08	0,01	14,54	1,21
2	12,53	1,06	0,27	0,01	0,15	0,00	12,95	1,06
3	11,41	0,84	0,49	0,01	0,27	0,01	12,17	0,86
4	10,11	1,68	0,98	0,31	0,26	0,08	11,35	1,75
Salgar								
1	5,08	0,24	0,18	0,00	0,08	0,01	5,34	0,25
2	5,04	0,26	0,32	0,01	0,15	0,01	5,51	0,26
3	4,60	0,61	0,46	0,05	0,23	0,00	5,29	0,65
4	3,92	0,42	0,63	0,05	0,27	0,03	4,82	0,46
San Simón								
1	6,38	0,12	0,19	0,00	0,08	0,00	6,66	0,12
2	6,36	0,16	0,36	0,01	0,13	0,00	6,86	0,16
3	5,69	0,84	0,52	0,05	0,22	0,00	6,44	0,89
4	5,04	0,36	0,79	0,04	0,32	0,01	6,15	0,40
Doscientos – Sevilla								
1	5,75	0,08	0,20	0,01	0,15	0,01	6,10	0,09
2	5,39	0,46	0,35	0,01	0,23	0,00	5,97	0,45
3	4,97	0,49	0,53	0,03	0,40	0,01	5,90	0,52
4	3,88	0,12	0,76	0,03	0,47	0,03	5,10	0,16
Suroeste								
1	5,02	0,05	0,16	0,00	0,11	0,00	5,29	0,05
2	4,89	0,46	0,30	0,01	0,17	0,00	5,36	0,45
3	4,54	0,71	0,49	0,04	0,28	0,01	5,32	0,74
4	3,63	0,37	0,72	0,03	0,33	0,01	4,68	0,39
Timbío								
1	9,86	0,18	0,24	0,00	0,08	0,00	10,18	0,18
2	9,31	0,14	0,35	0,00	0,13	0,00	9,78	0,14
3	8,93	0,25	0,55	0,02	0,20	0,03	9,69	0,24
4	7,68	0,37	0,81	0,02	0,22	0,06	8,71	0,40
Chinchiná – Venecia								
1	1,99	0,17	0,13	0,00	0,06	0,00	2,19	0,17
2	2,07	0,27	0,22	0,01	0,10	0,00	2,39	0,27
3	1,95	0,31	0,30	0,02	0,14	0,03	2,39	0,36
4	1,64	0,14	0,35	0,02	0,21	0,01	2,20	0,14

Los valores de la suma de bases fueron inferiores a los de la CIC, diferencia que se debe a la carga variable de los suelos y la determinación de la CIC mediante el Ac. Amonio 1,0 M amortiguado a pH 7,0 (Shoji et al., 1993). Resultados similares fueron obtenidos por Agbenin y Yakubu (2006) para algunos suelos ácidos en la sabana del norte de Nigeria, con base en los cuales estos autores señalan que la suma de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , extraídos con una sal que no modifique el pH de suelo – como la utilizada en este estudio ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 0,1 M)– puede reflejar mejor la CIC efectiva del suelo.

Para los 14 suelos, el incremento de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en las soluciones de intercambio utilizadas en los tratamientos, se tradujo en aumentos de Mg^{2+} y K^+ , en tanto que el Ca^{2+} tendió a reducirse. Lo anterior indica que pese a la mayor selectividad de los suelos por el Ca^{2+} , como consecuencia de su carga y radio iónico (Bohn et al., 2001; Sparks, 2003), cierta cantidad de Mg^{2+} y K^+ es capaz de adsorberse por el complejo de cambio aún cuando su contenido en la solución de equilibrio es bajo. De acuerdo con Loyola y Pavan (1989), el aumento de la afinidad de los sitios de intercambio del suelo por el Mg^{2+} y K^+ con el incremento de la fuerza iónica de las soluciones, indica una probable presencia de sitios heterogéneos para las reacciones de intercambio Ca–Mg y Ca–K. En adición a lo anterior, Essington (2004) aclara que la dilución de una solución de equilibrio favorece la retención del ión más altamente cargado; respuesta que se corroboró en los tratamientos con menor fuerza iónica.

A pesar de los cambios generados en los contenidos de los tres cationes intercambiables por la aplicación de los tratamientos, la sumatoria de éstos tiende a conservarse; de ahí, la alta correlación entre los valores iniciales (suelos sin tratamientos, Tabla 3–1) y los finales (suelos con la aplicación de los tratamientos de intercambio) (Figura 3–6). En este sentido, las pequeñas variaciones en la mayoría de los casos se pueden atribuir al error experimental, generado en el proceso de la extracción incompleta de estos cationes con $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. En algunos casos se presentaron diferencia relativamente marcadas; por ejemplo, la unidad Paujíl, en cuyo caso la suma de bases pasó de 7,18 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ a 12,75 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Este resultado en particular se puede relacionar con el incremento de la CIC, ocasionado con un aumento en el pH original del suelo, pues pese a que en todas las unidades el pH promedio en la solución de equilibrio fue más alto que el valor obtenido en la caracterización inicial del suelo, la magnitud del cambio fue mayor en la unidad Paujíl (Figura 3–7). El anterior comportamiento se debe posiblemente al mayor contenido de arcilla de esta unidad y su mineralogía, factores que contribuyen a generar un bajo poder amortiguador. Otra unidad que exhibió aumentos con la suma de sus bases con respecto a los valores iniciales fue Suroeste; en cuyo caso, el comportamiento observado estaría relacionado con el reemplazo de los muy altos contenidos de Al^{3+} (7,8 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) por la homogeneización de la fase de intercambio con calcio antes de aplicar los tratamientos. La ecuación que explica lo expuesto puede describirse así:



Cuando se realizó un análisis de regresión entre los valores iniciales y finales, eliminando las unidades Paujíl y Suroeste, se encontró una correlación más ajustada ($R^2=0,97$) y la pendiente de la recta fue muy próxima a 1,0 (Figura 3–8).

En la Tabla 3–4 se consignan los valores promedio de las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase de cambio, como respuesta a la aplicación de los tratamientos. Se registraron rangos muy amplios para los diferentes tratamientos dentro de una misma unidad de suelo o para un mismo

tratamiento entre diferentes unidades de suelo. Este comportamiento se relaciona con la retención selectiva de las bases, y revela la dificultad al que se enfrenta cuando se quieren modificar los cocientes en referencia. La relación de Ca^{2+} frente al Mg^{2+} y K^+ se redujo conforme al incremento de las concentraciones empleadas (fuerzas iónicas de las soluciones), como consecuencia de una mayor adsorción de estos últimos dos elementos en los suelos homogeneizados con Ca^{2+} . En cuanto a la relación Mg/K , pese a las diferencias observadas entre las unidades de suelos, los valores de este cociente tendieron a conservarse con los cambios generados por los cuatro tratamientos. Este resultado sugiere que bajo condiciones de una igualdad de competencia entre el Mg^{2+} y K^+ (relación 1:1 en términos de $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), cada suelo tiende a conservar cierta proporcionalidad particular para retener estos dos nutrientes.

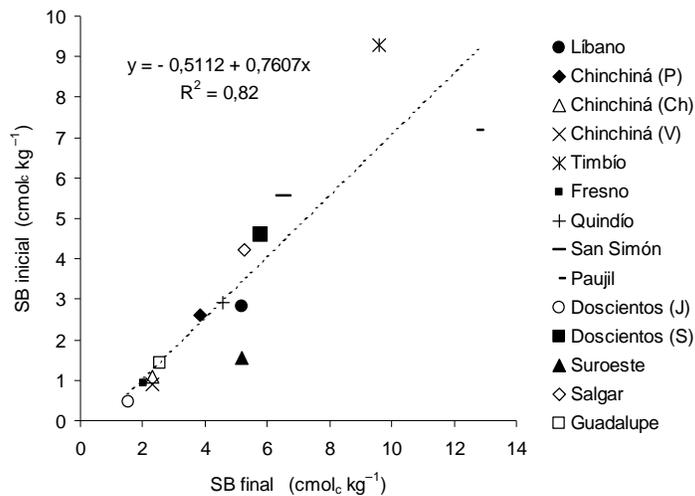


Figura 3–6. Relación entre los valores iniciales de la suma de cationes (suelos sin tratamientos) y los valores finales (suelos con la aplicación de los tratamientos de intercambio) en todas las unidades cartográficas evaluadas.

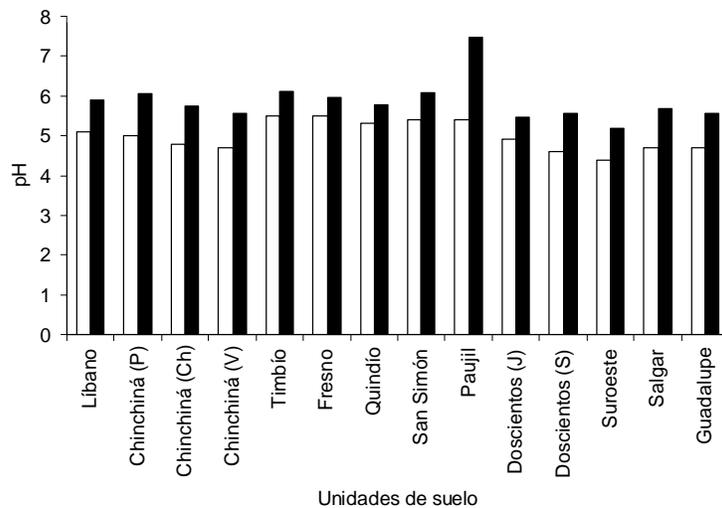


Figura 3–7. Valores del pH obtenidos en la evaluación inicial del suelo (□) y en la solución de equilibrio (■). Los valores de la solución de equilibrio corresponden al promedio de los cuatro tratamientos.

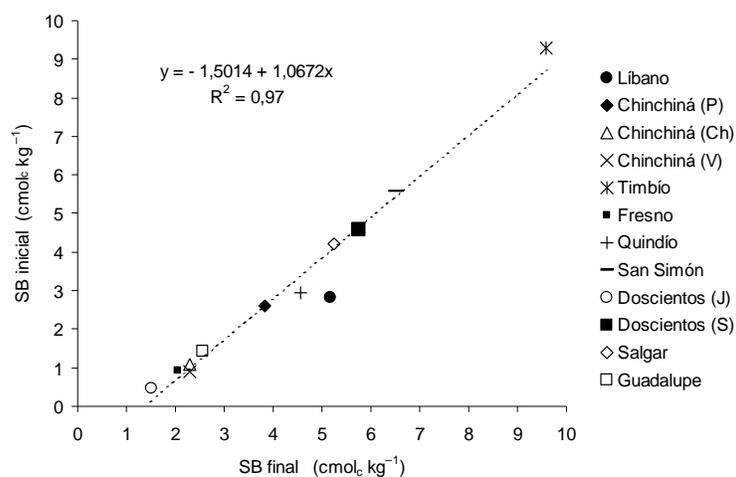


Figura 3–8. Relación entre los valores iniciales de la suma de bases (suelos sin tratamientos) y los valores finales (suelos con la aplicación de los tratamientos de intercambio) en 12 de las unidades cartográficas evaluadas. No se incluyen las unidades Suroeste ni Paujíl.

Tabla 3–4. Valores promedio de las relaciones entre cationes intercambiables en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K
(No.)	Chinchiná – Pereira				Fresno			
1	24	47	2,0	49	14	76	5,3	82
2	14	29	2,1	31	9	46	5,1	51
3	9	19	2,0	21	8	38	5,0	43
4	6	12	2,0	14	6	43	7,4	50
	Guadalupe				Doscientos – Jamundí			
1	14	39	2,7	41	10	32	3,3	35
2	8	21	2,7	24	6	19	3,2	22
3	6	14	2,5	16	4	12	2,8	14
4	4	9	2,4	11	3	9	2,7	12
	Líbano				Quindío			
1	29	98	3,4	102	25	54	2,2	57
2	17	68	4,1	72	14	33	2,3	36
3	11	47	4,3	51	9	20	2,1	22
4	7	32	4,4	36	6	13	2,2	15
	Chinchiná – Chinchiná				Paujíl			
1	15	60	4,1	64	76	175	2,3	177
2	9	40	4,4	44	46	85	1,8	87
3	7	27	4,1	31	23	42	1,8	44
4	5	22	4,2	26	10	39	3,7	42

Continuación Tabla 3-4. Valores promedio de las relaciones entre cationes intercambiables en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K
(No.)	Salgar				San Simón			
1	28	61	2,2	63	33	79	2,4	82
2	16	34	2,1	36	18	48	2,7	50
3	10	20	2,0	22	11	26	2,4	28
4	6	15	2,3	17	6	16	2,5	18
	Doscientos – Sevilla				Suroeste			
1	29	39	1,4	40	31	46	1,5	47
2	15	23	1,5	25	16	28	1,7	30
3	9	13	1,3	14	9	16	1,7	18
4	5	8	1,6	10	5	11	2,2	13
	Timbío				Chinchiná – Venecia			
1	42	127	3,1	130	15	35	2,3	37
2	27	74	2,8	77	10	20	2,1	22
3	16	44	2,7	47	7	14	2,1	16
4	9	35	3,7	39	5	8	1,7	10

Los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , detectados en la solución de equilibrio para cada uno de los tratamientos de intercambio se consignan en la Tabla 3-5, y en la Tabla 3-6 se presentan los correspondientes valores promedio de las actividades de estas tres bases, obtenidos mediante el programa de especiación ESPECIES (Barak, 1990).

Como era de esperarse, se encontró una relación muy estrecha entre la concentración y la actividad de los elementos en la solución del suelo (Figura 3-9). La importancia de lo anterior no radica en el resultado obtenido sino en los parámetros de las ecuaciones halladas; en este sentido, las pendientes de la regresión lineal para Ca^{2+} y Mg^{2+} fueron inferiores a 0,7, lo cual indica que la concentración de los iones libres de estos dos elementos en la solución es 30% menor que su concentración total. Para el caso de K^+ , la pendiente de la regresión lineal es de 0,91; por lo tanto, su actividad se redujo sólo en 9% con respecto a la concentración total.

Lo anterior se debe a la mayor afinidad de Ca^{2+} y Mg^{2+} para formar especies con el cloruro, fuente aniónica que se empleó para las reacción de intercambio, pues los constantes de equilibrio correspondientes a los cloruros de Ca y Mg, ($\log \text{ }^\circ\text{K}=0$ y $\log \text{ }^\circ\text{K}=-0,03$ respectivamente), son más altos que el cloruro de K ($\log \text{ }^\circ\text{K}=-0,7$) (Lindsay, 2001). Adicionalmente, de acuerdo al radio y la carga del ión, los elementos divalentes tienen menor actividad que los monovalentes (http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Equilibrios_quimicos.pdf).

Tabla 3–5. Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y la suma de bases (SB) en la solución de equilibrio, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio (No.)	Ca		Mg		K		SB	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(mmol _c L ⁻¹)								
Chinchiná – Pereira								
1	0,48	0,12	0,06	0,00	0,15	0,03	0,69	0,13
2	0,81	0,34	0,19	0,02	0,32	0,01	1,32	0,35
3	1,22	0,05	0,59	0,01	0,81	0,04	2,61	0,06
4	2,17	0,11	1,53	0,04	1,73	0,10	5,43	0,10
Fresno								
1	0,38	0,01	0,10	0,01	0,23	0,04	0,71	0,05
2	0,49	0,08	0,25	0,04	0,40	0,02	1,15	0,10
3	0,99	0,04	0,75	0,03	0,92	0,01	2,66	0,06
4	1,83	0,07	1,52	0,05	1,89	0,09	5,24	0,05
Guadalupe								
1	0,08	0,03	0,01	0,00	0,18	0,01	0,28	0,04
2	0,43	0,15	0,13	0,02	0,37	0,01	0,93	0,17
3	1,11	0,06	0,65	0,01	0,87	0,03	2,63	0,05
4	2,00	0,12	1,54	0,07	1,81	0,09	5,35	0,08
Doscientos – Janundí								
1	0,41	0,06	0,10	0,01	0,23	0,04	0,74	0,04
2	0,53	0,09	0,27	0,04	0,41	0,03	1,21	0,13
3	0,98	0,06	0,74	0,03	0,89	0,01	2,62	0,11
4	1,81	0,07	1,52	0,05	1,88	0,05	5,21	0,10
Líbano								
1	0,43	0,07	0,06	0,01	0,19	0,02	0,68	0,08
2	0,56	0,16	0,17	0,02	0,38	0,01	1,11	0,18
3	1,27	0,09	0,52	0,01	0,93	0,14	2,72	0,17
4	2,25	0,13	1,39	0,02	1,82	0,09	5,47	0,07
Quindío								
1	0,43	0,13	0,06	0,01	0,19	0,02	0,67	0,14
2	0,66	0,14	0,20	0,02	0,38	0,07	1,23	0,13
3	1,24	0,03	0,56	0,02	0,79	0,05	2,59	0,09
4	2,22	0,11	1,49	0,02	1,82	0,08	5,53	0,04
Chinchiná – Chinchiná								
1	0,33	0,04	0,08	0,00	0,19	0,01	0,61	0,03
2	0,53	0,06	0,24	0,03	0,40	0,01	1,17	0,10
3	0,98	0,10	0,72	0,02	0,91	0,03	2,62	0,14
4	1,91	0,09	1,54	0,08	1,81	0,11	5,26	0,13

Continuación Tabla 3-5. Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y la suma de bases (SB) en la solución de equilibrio, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio (No.)	Ca		Mg		K		SB	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(mmol _c L ⁻¹)								
Paujil								
1	0,22	0,04	0,01	0,00	0,19	0,05	0,43	0,01
2	1,24	0,32	0,07	0,02	0,29	0,02	1,61	0,33
3	2,32	0,30	0,27	0,01	0,67	0,03	3,26	0,29
4	4,05	0,52	0,75	0,04	1,50	0,14	6,30	0,34
Salgar								
1	0,28	0,08	0,04	0,00	0,18	0,04	0,50	0,03
2	0,78	0,10	0,16	0,01	0,24	0,01	1,19	0,11
3	1,46	0,09	0,50	0,01	0,63	0,02	2,58	0,06
4	2,52	0,09	1,40	0,03	1,43	0,09	5,34	0,13
San Simón								
1	0,19	0,02	0,02	0,00	0,17	0,04	0,39	0,04
2	0,65	0,11	0,10	0,02	0,33	0,02	1,07	0,09
3	1,43	0,11	0,42	0,01	0,79	0,05	2,65	0,05
4	2,55	0,17	1,24	0,02	1,68	0,12	5,48	0,10
Doscientos – Sevilla								
1	0,53	0,19	0,04	0,00	0,08	0,01	0,65	0,19
2	0,83	0,17	0,14	0,01	0,16	0,01	1,13	0,18
3	1,64	0,06	0,44	0,01	0,43	0,02	2,51	0,03
4	2,95	0,22	1,27	0,00	1,12	0,07	5,34	0,21
Suroeste								
1	0,52	0,18	0,03	0,00	0,10	0,01	0,65	0,18
2	0,81	0,21	0,13	0,01	0,20	0,01	1,14	0,20
3	1,67	0,15	0,40	0,01	0,52	0,02	2,58	0,13
4	2,91	0,18	1,19	0,01	1,21	0,07	5,30	0,12
Timbío								
1	0,46	0,13	0,04	0,00	0,15	0,02	0,65	0,10
2	0,79	0,06	0,11	0,00	0,28	0,01	1,17	0,07
3	1,58	0,06	0,32	0,01	0,70	0,04	2,60	0,06
4	2,91	0,24	0,94	0,02	1,54	0,13	5,39	0,20
Chinchiná – Venecia								
1	0,48	0,09	0,08	0,00	0,14	0,02	0,70	0,08
2	0,67	0,07	0,24	0,03	0,28	0,01	1,18	0,11
3	1,13	0,05	0,67	0,02	0,73	0,02	2,53	0,07
4	2,02	0,07	1,56	0,09	1,59	0,08	5,17	0,15

Tabla 3-6. Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de actividad de los cationes en la solución de equilibrio, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio (No.)	Ca		Mg		K		- Fuerza iónica -	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(mmol _c L ⁻¹)								
Chinchiná – Pereira								
1	0,206	0,048	0,028	0,002	0,143	0,028	0,957	0,187
2	0,331	0,130	0,081	0,008	0,305	0,014	1,822	0,526
3	0,468	0,017	0,229	0,005	0,759	0,041	3,516	0,084
4	0,752	0,034	0,537	0,015	1,582	0,103	7,279	0,151
Fresno								
1	0,165	0,004	0,045	0,003	0,223	0,047	0,955	0,051
2	0,207	0,034	0,107	0,016	0,387	0,018	1,525	0,146
3	0,382	0,016	0,292	0,009	0,861	0,012	3,538	0,092
4	0,638	0,023	0,539	0,016	1,733	0,096	6,916	0,095
Guadalupe								
1	0,038	0,013	0,005	0,001	0,182	0,014	0,327	0,055
2	0,183	0,063	0,054	0,010	0,361	0,013	1,209	0,256
3	0,426	0,023	0,254	0,005	0,818	0,031	3,517	0,077
4	0,694	0,041	0,544	0,025	1,660	0,093	7,127	0,083
Doscientos – Jamundí								
1	0,177	0,024	0,045	0,003	0,222	0,043	0,998	0,057
2	0,220	0,034	0,113	0,017	0,398	0,033	1,612	0,180
3	0,379	0,021	0,289	0,012	0,837	0,014	3,487	0,156
4	0,631	0,022	0,539	0,015	1,725	0,054	6,877	0,146
Líbano								
1	0,188	0,030	0,025	0,004	0,187	0,021	0,927	0,113
2	0,233	0,064	0,074	0,007	0,368	0,011	1,479	0,265
3	0,488	0,032	0,202	0,003	0,869	0,150	3,622	0,188
4	0,780	0,042	0,488	0,005	1,668	0,101	7,288	0,120
Quindío								
1	0,186	0,055	0,025	0,004	0,180	0,025	0,914	0,205
2	0,273	0,056	0,083	0,010	0,363	0,074	1,662	0,196
3	0,477	0,010	0,218	0,007	0,747	0,050	3,500	0,111
4	0,767	0,035	0,522	0,005	1,665	0,081	7,386	0,095
Chinchiná – Chinchiná								
1	0,146	0,018	0,036	0,002	0,187	0,010	0,816	0,051
2	0,220	0,025	0,100	0,013	0,388	0,010	1,553	0,149
3	0,379	0,038	0,282	0,008	0,858	0,029	3,481	0,205
4	0,666	0,030	0,544	0,025	1,663	0,119	6,993	0,152

Continuación Tabla 3-6. Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de actividad de los cationes en la solución de equilibrio, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio (No.)	Ca		Mg		K		SB	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(mmol _c L ⁻¹)								
Paujil								
1	0,101	0,019	0,005	0,000	0,188	0,053	0,548	0,014
2	0,501	0,122	0,029	0,010	0,278	0,023	2,263	0,479
3	0,862	0,100	0,102	0,004	0,628	0,032	4,548	0,443
4	1,359	0,160	0,257	0,015	1,363	0,151	8,672	0,582
Salgar								
1	0,125	0,034	0,016	0,002	0,176	0,047	0,658	0,073
2	0,325	0,040	0,069	0,006	0,234	0,011	1,662	0,163
3	0,559	0,031	0,194	0,006	0,589	0,024	3,561	0,098
4	0,871	0,029	0,491	0,008	1,309	0,091	7,299	0,171
San Simón								
1	0,087	0,008	0,011	0,001	0,167	0,043	0,497	0,038
2	0,272	0,043	0,043	0,008	0,315	0,019	1,450	0,138
3	0,550	0,040	0,165	0,005	0,746	0,058	3,581	0,096
4	0,881	0,058	0,436	0,008	1,539	0,132	7,367	0,151
Doscientos – Sevilla								
1	0,231	0,080	0,017	0,001	0,079	0,013	0,941	0,286
2	0,346	0,065	0,060	0,004	0,151	0,014	1,617	0,255
3	0,632	0,023	0,171	0,006	0,403	0,025	3,555	0,054
4	1,019	0,070	0,443	0,003	1,022	0,076	7,440	0,309
Suroeste								
1	0,224	0,076	0,014	0,002	0,096	0,007	0,922	0,275
2	0,337	0,082	0,054	0,006	0,194	0,007	1,611	0,304
3	0,639	0,052	0,153	0,002	0,485	0,023	3,611	0,209
4	1,005	0,059	0,417	0,007	1,106	0,075	7,343	0,196
Timbío								
1	0,202	0,053	0,017	0,002	0,146	0,023	0,902	0,164
2	0,330	0,025	0,044	0,002	0,267	0,009	1,623	0,100
3	0,606	0,023	0,126	0,004	0,658	0,040	3,549	0,086
4	1,007	0,076	0,329	0,004	1,414	0,133	7,305	0,306
Chinchiná – Venecia								
1	0,206	0,039	0,037	0,002	0,136	0,018	0,983	0,123
2	0,278	0,029	0,100	0,013	0,266	0,008	1,639	0,161
3	0,435	0,019	0,264	0,007	0,682	0,025	3,436	0,098
4	0,705	0,025	0,552	0,031	1,457	0,083	6,965	0,174

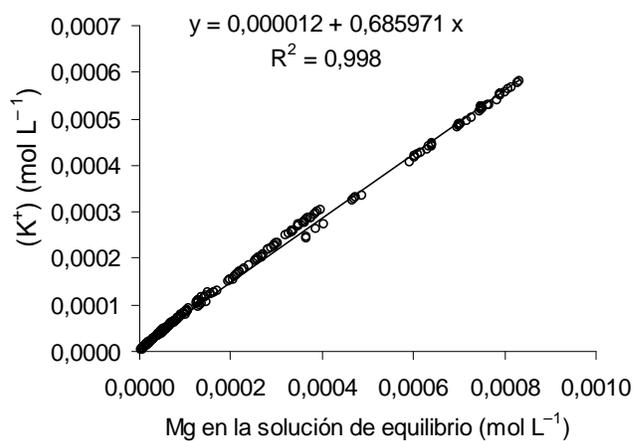
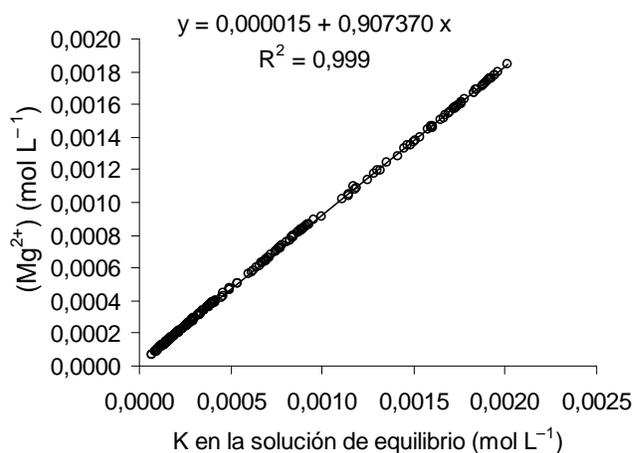
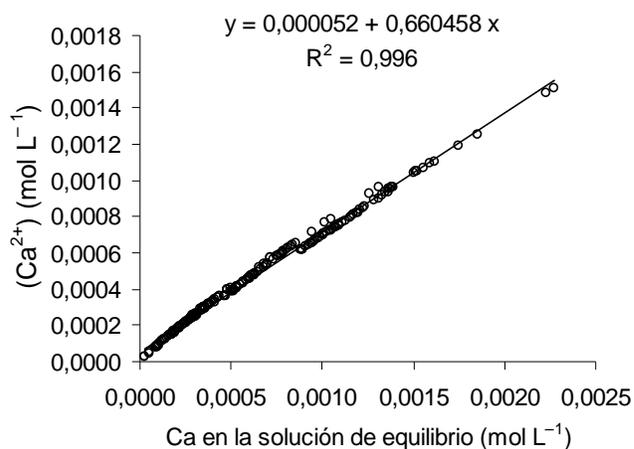


Figura 3-9. Actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ –denotadas entre paréntesis– en función de su concentración en la solución de equilibrio.

3.1.3 Coeficientes de selectividad para el intercambio catiónico Ca-Mg

Los coeficientes de selectividad de Vanselow (K_V) para los intercambios catiónicos Ca-Mg, K-Ca y K-Mg, calculados a partir de la información de las Tabla 3-3 y 3-6 se presentan en la Tabla 3-7. Estos se obtuvieron con base en las siguientes ecuaciones, como se detalló en materiales y métodos:

$$K_1 = \frac{(Ca)^{1/2}}{(Mg)^{1/2}} * \frac{X_{1/2}Mg}{X_{1/2}Ca}; K_2 = \frac{(K)}{(Ca)^{1/2}} * \frac{X_{1/2}Ca}{XK}; K_3 = \frac{(K)}{(Mg)^{1/2}} * \frac{X_{1/2}Mg}{XK}$$

Los valores de K_V para el intercambio Ca-Mg (K_V Ca-Mg) fueron inferiores a 0,35; esto indica la fuerte preferencia que tienen todos los suelos objeto de estudio por el Ca^{2+} , antes el Mg^{2+} , aún al incrementar la concentración de los dos elementos en la solución de equilibrio. El coeficiente más alto para este intercambio correspondió al tratamiento con la mayor concentración de cationes en las soluciones de intercambio, o de la fuerza iónica, en la unidad Doscientos en Jamundí (0,32), valor que resulta menor que los reportados en trabajos similares por Loyola y Pavan (1989) para suelos de Brasil y por Robbins et al. (1980) para suelos de Estados Unidos. De acuerdo con Sparks (2003) y Essington (2004), las variaciones en los coeficientes de selectividad son indicativas de la heterogeneidad de los sitios de adsorción en los suelos.

Teniendo en cuenta el promedio de los cuatro tratamientos de intercambio, se presentó el siguiente orden para el coeficiente de la selectividad Ca-Mg: Paujíl (metamórfico) < Timbío (volcánico) < Líbano (volcánico) < Quindío (volcánico) < Chinchiná-Pereira (volcánico) < San Simón (ígneo) < Salgar (metamórfico) < Fresno (volcánico) < Chinchiná-Chinchiná (volcánico) < Chinchiná-Venecia (volcánico) < Doscientos-Sevilla (ígneo) < Suroeste (sedimentario) < Guadalupe (sedimentario) < Doscientos-Jamundí (ígneo).

La selectividad por el Ca^{2+} estuvo relacionada fuertemente con su contenido en la fase de cambio, por ejemplo, las unidades Timbío y Paujíl, las cuales se caracterizaron por presentar los valores más altos de Ca^{2+} intercambiable (Tabla 3-7), también exhibieron una selectividad mayor por este elemento; en contraposición a lo anterior, la unidad Doscientos-Jamundí presentó una tendencia opuesta. Lo anterior se puede expresar a través de la relación entre el coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio Ca-Mg (K_V Ca-Mg) en función de la fracción equivalente de Ca^{2+} (\bar{E}_{Ca}), es decir la proporción relativa que ocupa el Ca^{2+} en los sitios de intercambio ($\bar{E}_{Ca} = Ca^{2+} / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$) (Figura 3-10). Nótese en este caso cómo a medida en que se incrementa la proporción de Ca^{2+} frente al Mg^{2+} aumenta la selectividad por el primero (valores más bajos de K_V Ca-Mg).

En general, no se logró establecer una relación clara entre la mineralogía, o en su defecto el origen de los suelos, y dicha selectividad. Sólo se puede hacer referencia al hecho que en algunas unidades de suelo el tipo del mineral tuvo cierta influencia, como es el caso del material predominante en la unidad Timbío, la anortita, el cual es una fuente importante de Ca^{2+} .

Tabla 3-7. Valores promedio de coeficientes de selectividad de Vanselow para los intercambios catiónicos Ca-Mg, K-Ca y K-Mg, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio	— K _v Ca-Mg —		— K _v K-Ca —		— K _v K-Mg —	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(No.)	Chinchiná – Pereira					
1	0,116	0,019	0,476	0,099	0,055	0,013
2	0,146	0,026	0,498	0,082	0,071	0,003
3	0,156	0,017	0,662	0,126	0,102	0,011
4	0,197	0,018	0,687	0,132	0,133	0,016
	Fresno					
1	0,134	0,016	1,510	0,887	0,192	0,090
2	0,155	0,026	1,256	0,138	0,192	0,028
3	0,152	0,016	1,659	0,205	0,251	0,017
4	0,191	0,016	4,301	3,515	0,792	0,617
	Guadalupe					
1	0,181	0,030	1,184	0,225	0,211	0,032
2	0,230	0,056	0,606	0,186	0,133	0,016
3	0,236	0,017	0,554	0,082	0,130	0,011
4	0,310	0,027	0,554	0,122	0,169	0,023
	Doscientos – Jamundí					
1	0,207	0,035	0,563	0,253	0,111	0,032
2	0,246	0,046	0,501	0,035	0,122	0,021
3	0,282	0,030	0,502	0,078	0,140	0,010
4	0,328	0,026	0,623	0,144	0,202	0,038
	Líbano					
1	0,098	0,020	1,384	0,354	0,131	0,013
2	0,107	0,024	1,683	0,379	0,175	0,012
3	0,143	0,013	1,963	0,927	0,274	0,113
4	0,178	0,012	1,928	0,509	0,339	0,071
	Quindío					
1	0,110	0,024	0,740	0,164	0,079	0,012
2	0,128	0,026	0,760	0,265	0,094	0,028
3	0,161	0,014	0,688	0,147	0,109	0,015
4	0,199	0,012	0,808	0,190	0,159	0,030
	Chinchiná – Chinchiná					
1	0,135	0,014	0,954	0,197	0,127	0,014
2	0,163	0,016	1,050	0,123	0,169	0,008
3	0,175	0,022	1,224	0,261	0,212	0,037
4	0,214	0,018	1,547	0,755	0,322	0,135

Continuación Tabla 3-7. Valores promedio de coeficientes de selectividad de Vanselow para los intercambios catiónicos Ca-Mg, K-Ca y K-Mg, en respuesta a los tratamientos con soluciones de intercambio.

Solución de intercambio	— K_V Ca-Mg —		— K_V K-Ca —		— K_V K-Mg —	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
(No.)			Paujil			
1	0,057	0,009	3,702	2,102	0,198	0,087
2	0,094	0,022	1,065	0,057	0,099	0,019
3	0,124	0,002	0,898	0,057	0,112	0,008
4	0,222	0,059	1,543	0,610	0,370	0,245
			Salgar			
1	0,098	0,013	1,075	0,627	0,100	0,044
2	0,137	0,020	0,439	0,025	0,060	0,006
3	0,171	0,015	0,496	0,099	0,084	0,011
4	0,215	0,011	0,657	0,142	0,141	0,024
			San Simón			
1	0,085	0,008	1,447	0,492	0,120	0,031
2	0,144	0,030	0,914	0,117	0,130	0,016
3	0,170	0,019	0,831	0,202	0,138	0,020
4	0,222	0,015	0,827	0,155	0,182	0,022
			Doscientos – Sevilla			
1	0,127	0,026	0,212	0,066	0,026	0,005
2	0,157	0,031	0,192	0,024	0,030	0,004
3	0,208	0,014	0,203	0,035	0,042	0,005
4	0,297	0,010	0,268	0,035	0,080	0,009
			Suroeste			
1	0,126	0,024	0,303	0,055	0,037	0,002
2	0,157	0,045	0,305	0,064	0,046	0,005
3	0,225	0,030	0,310	0,076	0,068	0,009
4	0,310	0,027	0,396	0,092	0,121	0,018
			Timbío			
1	0,084	0,017	1,372	0,454	0,110	0,020
2	0,103	0,007	1,084	0,006	0,111	0,008
3	0,136	0,008	1,211	0,204	0,165	0,034
4	0,185	0,007	1,693	0,589	0,315	0,117
			Chinchiná – Venecia			
1	0,160	0,029	0,343	0,123	0,053	0,010
2	0,178	0,027	0,325	0,044	0,057	0,005
3	0,198	0,021	0,463	0,114	0,092	0,024
4	0,244	0,024	0,441	0,084	0,106	0,013

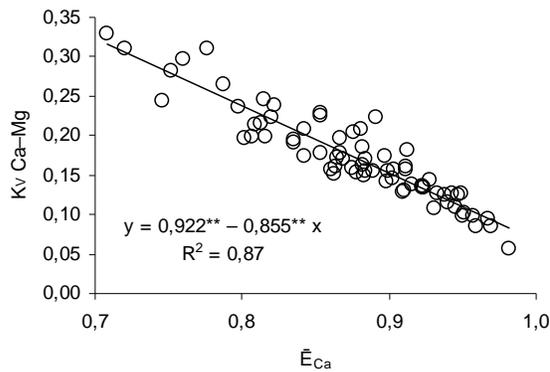


Figura 3–10. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio Ca–Mg (K_V Ca–Mg) en función de la fracción equivalente de Ca^{2+} (\bar{E}_{Ca}). (n=56).

La variable que en mayor grado explicó las variaciones del K_V fue el pH; los incrementos de éste se tradujeron en la reducción del K_V en todos los suelos a excepción de la unidad Paujíl, la cual experimentó fuertes cambios en su acidez en consecuencia de la aplicación de los tratamientos, como ya se mencionó (Figura 3–11). Sobre el tema, se resalta el hecho que los suelos objeto de estudio se caracterizan por ser de carga variable, en los cuales el incremento en el pH se traduce en un aumento de CIC (Shoji et al., 1993).

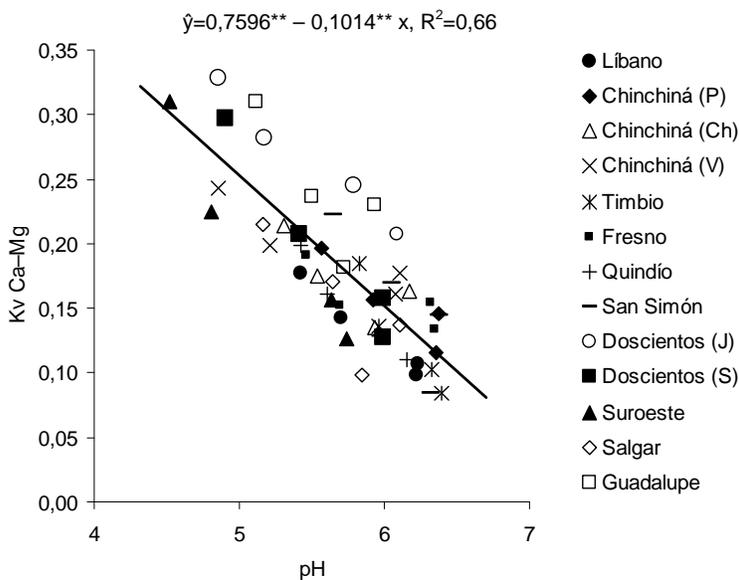


Figura 3–11. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio Ca–Mg (K_V Ca–Mg), en función del pH de la solución de equilibrio. (n=56). No se incluye el suelo de la unidad Paujíl.

Puesto que los valores del pH tendieron a reducirse con el incremento de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio empleadas (Tabla 3–8), el K_V Ca–Mg tendió a incrementarse, indicando así aumentos en la selectividad por el Mg^{2+} ; sin embargo, la magnitud del cambio fue baja y persistió la preferencia general por el Ca^{2+} .

Tabla 3–8. Valores promedio del pH y desviación estándar (D.E.), correspondientes a los tratamientos de intercambio en las unidades de suelos evaluados.

Unidad de suelo	Solución de intercambio							
	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
Chinchiná – Pereira	6,35	0,21	6,38	0,26	5,93	0,28	5,57	0,07
Fresno	6,35	0,21	6,32	0,23	5,70	0,19	5,46	0,13
Guadalupe	5,72	0,29	5,93	0,03	5,50	0,21	5,12	0,04
Doscientos – Jamundí	6,09	0,41	5,79	0,27	5,17	0,19	4,85	0,08
Líbano	6,22	0,33	6,23	0,22	5,71	0,13	5,43	0,16
Quindío	6,16	0,36	5,97	0,26	5,60	0,11	5,42	0,15
Chinchiná – Chinchiná	5,94	0,49	6,18	0,36	5,54	0,19	5,31	0,08
Paujíl	7,55	0,12	7,59	0,08	7,46	0,03	7,32	0,12
Salgar	5,85	0,45	6,10	0,24	5,64	0,14	5,16	0,15
San Simón	6,31	0,35	6,37	0,19	6,05	0,10	5,64	0,48
Doscientos – Sevilla	5,99	0,62	6,00	0,15	5,41	0,23	4,90	0,13
Suroeste	5,74	0,58	5,64	0,11	4,81	0,05	4,52	0,07
Timbio	6,40	0,24	6,33	0,30	5,96	0,13	5,83	0,17
Chinchiná – Venecia	6,08	0,38	6,11	0,28	5,21	0,15	4,86	0,12

En suelos ricos en la materia orgánica es posible que un incremento en la densidad de carga, como consecuencia del incremento del pH, conlleve a una mayor preferencia por los iones polivalentes sobre los monovalentes, pero tratándose de dos iones divalentes, la selectividad tendrá lugar a favor del que menos potencial iónico presente (Bohn et al., 2001). Por lo anterior, y dada la reducción de los valores del pH en conformidad con el aumento de las concentraciones de las soluciones de intercambio, resulta razonable atribuir parte del cambio en la selectividad a la acidez generada. De acuerdo con los resultados encontrados por Altaf et al. (2000), las variaciones en el pH pueden afectar los coeficientes de selectividad tanto para intercambios homovalentes como heterovalentes. A lo anterior se debe sumar el efecto de la fuerza iónica y de la concentración del Mg^{2+} enmarcado dentro de la acción de masas. Staunton y Roubaud (1997) también hallaron cambios en la preferencia de Cesio (Cs) al aumentar la fuerza iónica de la solución del trabajo con montmorillonita e illita.

Uno de los efectos del pH sobre los fenómenos de adsorción se relaciona con los cambios en la especiación de los elementos (Spark, 2003; Sposito, 2004); además, el incremento del pH del suelo aumenta la preferencia de los iones polivalentes en contra de los monovalentes (Bohn et al., 2001). En un trabajo desarrollado en suelos altamente meteorizados, Casagrande et al. (2008) demostraron que la fuerza iónica no afectó la adsorción de Zn^{2+} –ión divalente como el Ca^{2+} y Mg^{2+} – para valores de pH entre 3,0 y 5,0, pues en este rango predominan básicamente los mecanismos específicos de adsorción, a través de la formación de enlaces covalente entre las diferentes especies de Zn^{2+} y las cargas del suelo; en tanto que para pH's mayores a 5,0 el Zn^{2+} fue adsorbido mediante mecanismos electrostáticos y por lo tanto se observó el efecto de la fuerza iónica.

El análisis de varianza para el intercambio catiónico Ca–Mg (anexo C), indica que hubo efectos significativos de la Unidad de suelo, de la Concentración de los cationes en las soluciones de intercambio y de la interacción Unidad de suelo x Concentración, con lo cual se corrobora la primera hipótesis planteada para esta variable. De acuerdo con la metodología planteada se procedió a evaluar en cada unidad de suelo la tendencia lineal, cuadrática y cúbica de este coeficiente con respecto a la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en las soluciones de intercambio.

En todos los suelos, los valores de K_V para el intercambio Ca–Mg se incrementaron conforme al aumento de la fuerza iónica; es decir, que la selectividad por el Mg^{2+} aumentó conforme se incrementó su concentración en la solución, como consecuencia de una mayor competencia de este catión con respecto al Ca^{2+} . Para todas las unidades el comportamiento de la respuesta fue explicado mediante una tendencia lineal, sólo en Timbío dicho comportamiento se ajustó más a un modelo cuadrático (Tabla 3–9).

Tabla 3–9. Ecuaciones de regresión correspondientes al coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio Ca–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para las unidades de suelo.

No.	Unidad de suelo	Ecuación	R ²
1	Líbano	$\hat{y}=0,08797^{**} + 0,04636^{**} x$	0,787
2	Chinchiná – Pereira	$\hat{y}=0,11457^{**} + 0,04176^{**} x$	0,682
3	Chinchiná – Chinchiná	$\hat{y}=0,13268^{**} + 0,04137^{**} x$	0,732
4	Chinchiná – Venecia	$\hat{y}=0,15163^{**} + 0,04627^{**} x$	0,661
5	Timbío	$\hat{y}=0,06412^{**} + 0,08281^{**} x - 0,01124^{*} x^2$	0,944
6	Fresno	$\hat{y}=0,13026^{**} + 0,02958^{**} x$	0,559
7	Quindío	$\hat{y}=0,10279^{**} + 0,04998^{**} x$	0,775
8	San Simón	$\hat{y}=0,08981^{**} + 0,06983^{**} x$	0,801
9	Paujíl	$\hat{y}=0,03910^{**} + 0,09108^{**} x$	0,826
10	Doscientos – Jamundí	$\hat{y}=0,20502^{**} + 0,06484^{**} x$	0,647
11	Doscientos – Sevilla	$\hat{y}=0,10749^{**} + 0,09597^{**} x$	0,917
12	Suroeste	$\hat{y}=0,10658^{**} + 0,10445^{**} x$	0,850
13	Salgar	$\hat{y}=0,09710^{**} + 0,06225^{**} x$	0,860
14	Guadalupe	$\hat{y}=0,17739^{**} + 0,06590^{**} x$	0,641

\hat{y} : Coeficiente de selectividad de Vanselow (K_V) estimado para el intercambio Ca–Mg, x: concentración de cationes en las soluciones de intercambio ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$).

*, ** significativo a 5 y 1% de probabilidad, según la prueba Tukey.

Se logró reunir los 13 suelos con tendencia lineal en cuatro grupos, de acuerdo con las pendientes de sus modelos de regresión (Figura 3–12). La prueba de comparación de Duncan ($P < 0,05\%$) indicó que las unidades cartográfica de Suroeste, Doscientos en Sevilla y Paujíl son estadísticamente iguales en sus pendientes y presentan, en promedio, una mayor tasa de cambio en el K_V del intercambio Ca–Mg al incrementar la concentración de los cationes en la solución de intercambio (Prueba Tukey al 5%). El segundo grupo con mayor pendiente se integró por las unidades San Simón, Guadalupe, Doscientos en Jamundí y Salgar; el tercero se conformó por Quindío, Líbano, Chinchiná en Venecia, Chinchiná en Pereira y Chinchiná en Chinchiná, y en el cuarto grupo solo se ubicó la unidad Fresno. Puede notarse que los suelos con propiedades ándicas, es decir los grupos 3 y 4, son los que ofrecen mayor resistencia para modificar su selectividad con los cambios en la fuerza iónica (concentración de cationes). No hubo una tendencia que indique una mayor resistencia

de los Andisoles para modificar su acidez, para así poder justificar su comportamiento. Se utilizó la metodología descrita por Little et al. (1996) con el fin de generar los nuevos modelos lineales para cada unidad de suelo (Tabla 3–10); los cuales tienen interceptos diferentes, pero algunos comparten la misma pendiente. El comportamiento general de estos modelos para el rango de los tratamientos aplicados se observa en la Figura 3–13.

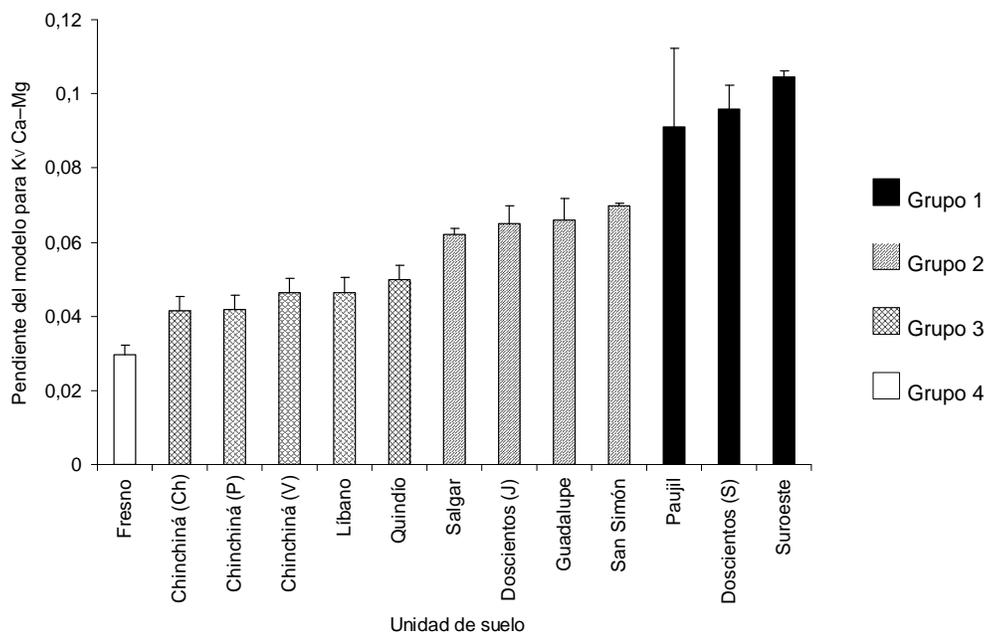


Figura 3–12. Pendientes de los modelos de regresión lineal para K_V Ca–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio.

Tabla 3–10. Nuevos modelos de regresión para el coeficiente de selectividad Ca–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para 13 unidades de suelo.

No.	U. Suelo	Grupo	Ecuación
9	Paujil	1	$\hat{y}=0,03339^{**} + 0,09717^{**} x$
11	Doscientos – Sevilla	1	$\hat{y}=0,10635^{**} + 0,09717^{**} x$
12	Suroeste	1	$\hat{y}=0,1134^{**} + 0,09717^{**} x$
8	San Simón	2	$\hat{y}=0,09368^{**} + 0,06570^{**} x$
10	Doscientos – Jamundí	2	$\hat{y}=0,20421^{**} + 0,06570^{**} x$
13	Salgar	2	$\hat{y}=0,09386^{**} + 0,06570^{**} x$
14	Guadalupe	2	$\hat{y}=0,17756^{**} + 0,06570^{**} x$
1	Líbano	3	$\hat{y}=0,08910^{**} + 0,04515^{**} x$
7	Quindío	3	$\hat{y}=0,10731^{**} + 0,04515^{**} x$
2	Chinchiná – Pereira	3	$\hat{y}=0,11139^{**} + 0,04515^{**} x$
3	Chinchiná – Chinchiná	3	$\hat{y}=0,12911^{**} + 0,04515^{**} x$
4	Chinchiná – Venecia	3	$\hat{y}=0,15268^{**} + 0,04515^{**} x$
6	Fresno	4	$\hat{y}=0,13026^{**} + 0,02958^{**} x$

\hat{y} : Coeficiente de selectividad de Vanselow (K_V) estimado para el intercambio Ca–Mg, x : concentración de cationes en las soluciones de intercambio ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$).

** significativo a 1% de probabilidad, según la prueba Tukey.

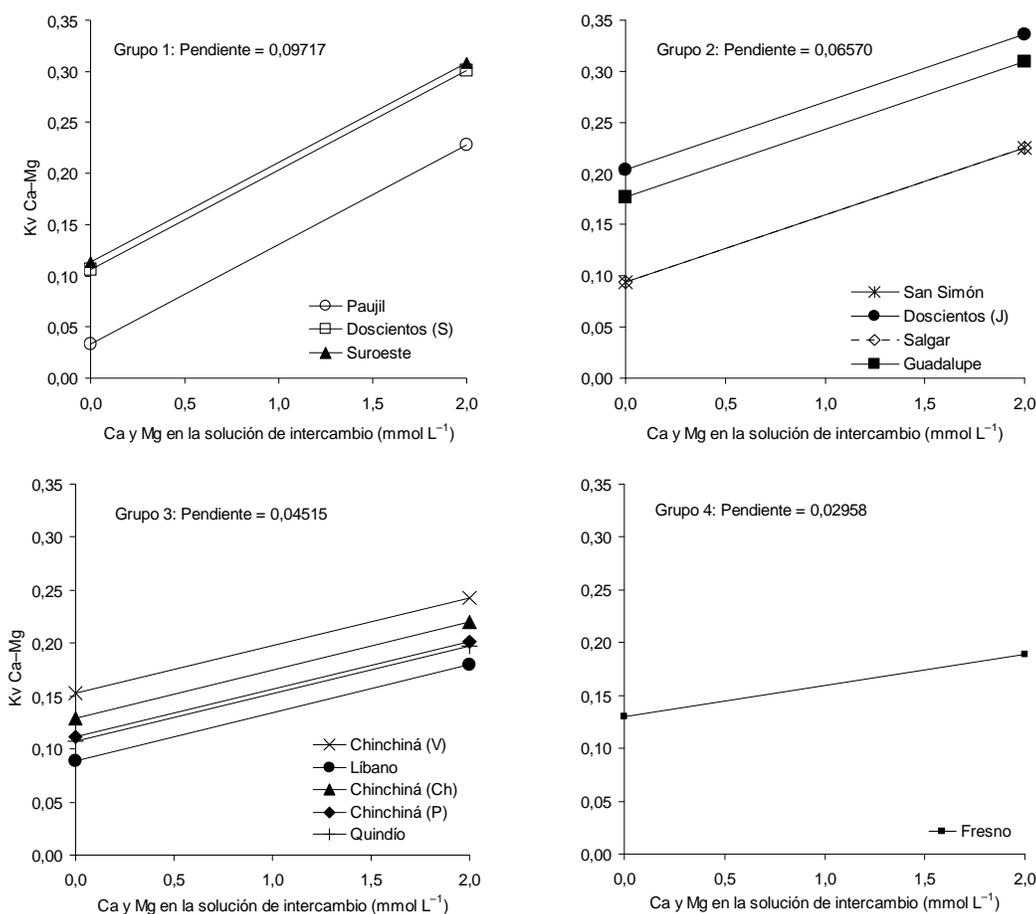


Figura 3–13. Agrupación de suelos por su similitud en los cambios de $K_V \text{ Ca-Mg}$ en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio.

3.1.4 Coeficientes de selectividad para el intercambio catiónico K–Ca

En contraposición al intercambio Ca–Mg, los valores del coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K–Ca ($K_V \text{ K-Ca}$) presentaron una alta variación entre unidades de suelos (promedios entre 0,29 y 2,18) (Tabla 3–7).

La unidad Doscientos en Sevilla, Suroeste y Chinchiná en Venecia exhibieron coeficientes inferiores a 0,5, lo cual indica una muy alta preferencia por K^+ antes que por Ca^{2+} . Los suelos pertenecientes a las unidades Doscientos en Jamundí, Chinchiná en Pereira, Salgar, Guadalupe y Quindío presentaron valores entre 0,50 y 0,75, comportamiento que también sugiere una alta preferencia, pero de menor magnitud que el anterior grupo. El coeficiente para San Simón fue 1,00; es decir que este suelo no presenta preferencia por alguno de estos dos elementos en particular. En

las unidades Chinchiná en Chinchiná, Timbío, Líbano, Paujíl y Fresno los promedios de K_V para el intercambio K–Ca fueron superiores a 1,0; tendencia que señala una menor preferencia por K^+ con respecto a Ca^{2+} . En dos casos se presentaron valores muy altos que se pueden considerar como atípico; el primero correspondió a la solución de intercambio con $0,25 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la unidad Paujíl y el segundo con la mayor concentración de los tres elementos ($2 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$) en la unidad Fresno. Los dos casos se pueden relacionar con el error experimental en el procedimiento analítico, dado que en ambos se presentó una alta desviación estándar, similar al promedio.

Se debe anotar que en el caso de la unidad Paujíl, el suelo contenido en los tubos tendió a dispersarse con los últimos lavados que se efectuaran en el tratamiento con la menor fuerza iónica, es decir menor concentración de cationes; efecto que fue notado en la turbidez de la solución de equilibrio. Sposito (2008), refiriéndose a la floculación de las partículas, resalta la importancia que tiene una alta fuerza iónica para lograrla de una manera más rápida. Se espera que la homogeneización inicial de la fase intercambiable de los suelos con Ca^{2+} mediante el uso de $CaCl_2$ $0,1 \text{ M}$ haya contribuido a la agregación de las partículas, dada la alta fuerza iónica de esta solución. Así mismo, es posible que la aplicación de los tratamientos de intercambio con menor fuerza iónica y los sucesivos lavados contribuyeran a lograr un efecto contrario, especialmente en los suelos ricos en arcilla, como el de Paujíl, el cual se caracterizó por presentar el mayor valor para esta fracción de partículas.

Al expresar la fracción equivalente de K^+ (\bar{E}_K) en función del coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K–Ca ($K_V \text{ K–Ca}$) (Figura 3–14), la relación fue relativamente estrecha para el promedio de los cuatro tratamientos aplicados ($R^2=0,74$). Se concluye por lo tanto, que una parte significativa del comportamiento de la selectividad por el K^+ (74%) es explicada por la proporción de este elemento frente a la suma de K^+ y Ca^{2+} .

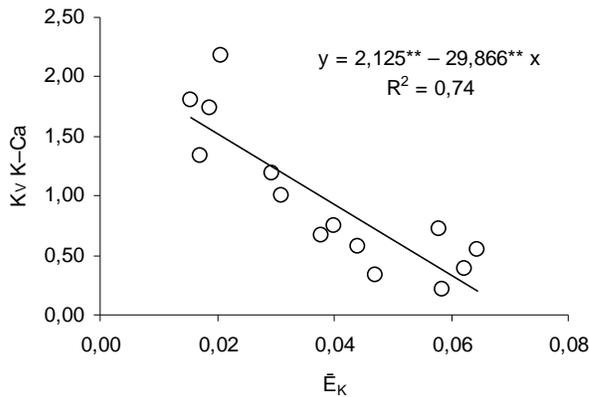


Figura 3–14. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K–Ca ($K_V \text{ K–Ca}$) en función de la fracción equivalente de K^+ (\bar{E}_K). (n=14).

Para el caso de la unidad Doscientos en Sevilla, parte de su alta preferencia por el K^+ puede relacionarse con los contenidos que tiene en minerales ricos en K (potasio ciclo-trifosfato, $CaKP_3O_9$, B Anexos); de modo similar, se puede relacionar la selectividad los contenidos de este elemento para las unidades Quindío, Guadalupe y San Simón con las fracciones de anfibolita, ortoclasa y microclina, respectivamente.

Diversos autores coinciden en que generalmente los suelos tienen una mayor preferencia por Ca^{2+} en vez de K^+ , como consecuencia de las diferencias que existen en sus cargas (Bohn et al., 2001; Essington, 2003; Spark, 2003; Sposito, 2008); siendo la mica y la vermiculita la excepción debido a su preferencia fuerte y “rara” por el K^+ (Bohn et al., 2001). Sin embargo, algunos estudios han demostrado que la tendencia descrita no siempre se presenta en todos los suelos. Mediante experimentos de intercambio binario y ternario, Feigenbaum et al. (1991) demostraron que K^+ era preferido sobre Ca^{2+} y $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ en suelos montmorilloníticos. Udo (1978) encontró que K^+ era adsorbido selectivamente sobre Ca^{2+} o Mg^{2+} en suelos caoliníticos del oeste de Nigeria. Similarmente, Jensen (1973) encontró mayor preferencia por adsorber K^+ que Ca^{2+} y Mg^{2+} en un amplio rango de suelos. Para Alfisoles y Ultisoles de Nigeria, Agbenin y Yakubu (2006) hallaron preferencia para retener K^+ sobre Ca^{2+} y Mg^{2+} . En contraposición a lo anterior, Karmarkar et al. (1991) reportan más preferencia por Ca^{2+} y Mg^{2+} que K^+ en suelos con mineralogía dominada por caolinita e illita. En cuanto a esta última arcilla, el proceso que predomina para retener el K^+ es la fijación (Bohn et al., 2001); razón por la cual, Andrist et al. (2006) consideran que la contribución de K^+ de las intercapas puede no ser significativa, y sólo tomar importancia si no se realizan prácticas de fertilización.

Öborn et al. (2005) hicieron un análisis de algunos aspectos en el manejo de K^+ en los sistemas agrícolas, y concluyeron que en ciertas áreas dominadas por suelos con arcillas jóvenes puede haber un potencial natural para suplir los requerimientos de K^+ , en tanto que en áreas donde predominan arenas cuarcíticas o materia orgánica, con baja meteorización potencial, hay necesidad de aportes externos.

En el estudio realizado por Henao y Delvaux (1998), las unidades Chinchiná en el municipio de Chinchiná (departamento de Caldas) y Fresno se distinguieron por una cantidad muy baja de sitios específicos por retener K^+ ; resultado que concuerda con lo obtenido en este estudio, dado que estos suelos se caracterizaron por ser poco selectivos frente a Ca^{2+} . Henao y Delvaux (1998) también encontraron que en las unidades Líbano y Montenegro la capacidad de almacenamiento de este elemento fue muy alta. En cuanto a la unidad Montenegro, la tendencia encontrada es comparable con la unidad Quindío, dada su alta similitud; sin embargo, lo hallado para Líbano difiere a lo detectado en esta investigación.

Es bien conocido que los grupos funcionales de la materia orgánica tienen una mayor afinidad por los cationes divalentes que por los monovalentes, comportamiento que se debe a la formación del enlace parcialmente covalente y/o la formación de complejos entre la materia orgánica y muchos cationes polivalentes (Bohn et al., 2001). Para Andisoles de la India con diferentes grados de meteorización, Ndayiragije et al. (2004) detectaron una mayor preferencia del intercambiador por los iones K^+ en el horizonte B con menor contenido de materia orgánica que el horizonte A. Agbenin y Yakubu (2006) encontraron un comportamiento similar en algunos perfiles de las sabanas del norte de Nigeria. Otros casos similares son reportados por Fletcher et al. (1984) y Nakahara y Wada (1995).

Al expresar los coeficientes promedios de selectividad para el intercambio K–Ca en función de los contenidos de la materia orgánica no se encontró relación alguna que indicara diferencia entre los suelos estudiados. Cuando se realizó el mismo ejercicio para cada uno de los tratamientos en particular, tampoco hubo una tendencia que corroborara una menor selectividad por el K^+ en los suelos con menor materia orgánica. Lo anterior sugiere que en suelos contrastantes en su origen y

mineralogía, como los evaluados aquí, este componente no tiene un peso contundente. Lo expuesto coincide con el reporte de Defelipo y Braga (1983), quienes tampoco hallaron relación entre la adsorción de K^+ y el contenido de la materia orgánica en diez suelos de Minas Gerais (Brasil), disímiles en la retención de K^+ .

El análisis de varianza mostró que hubo efecto significativo de la Unidad de suelo y la Concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución de intercambio, y la respectiva interacción (Anexo C); por lo tanto, se corrobora también la primera hipótesis planteada para esta variable. De acuerdo con la metodología planteada se procedió a evaluar en cada unidad de suelo las tendencias lineal, cuadrática y cúbica, cuyos resultados demostraron que sólo para las unidades Chinchiná-Pereira, Guadalupe y Paujil se presentó efecto significativo de las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ sobre el $K_V K-Ca$. En el caso de la primera unidad, la tendencia se ajustó a un modelo lineal, mientras que en los otros dos casos la respuesta fue de tipo cuadrático (Figura 3-15). En general, el ajuste de los modelos no fue alto ($R^2 < 0,62$), debido a altas desviaciones estándares de algunos tratamientos, como se mencionó anteriormente. Las tendencias registradas no fueron claras, pues de ellas sólo se desprende que en las unidades Paujil y Guadalupe la selectividad por el potasio tiende a aumentar con el incremento de la fuerza iónica, hasta alcanzar valores cercanos a $1 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, para luego reducir; en contraposición a lo anterior, la selectividad por este nutriente en la unidad Chinchiná de Pereira disminuyó de manera directamente proporcional al elevarse la fuerza iónica.

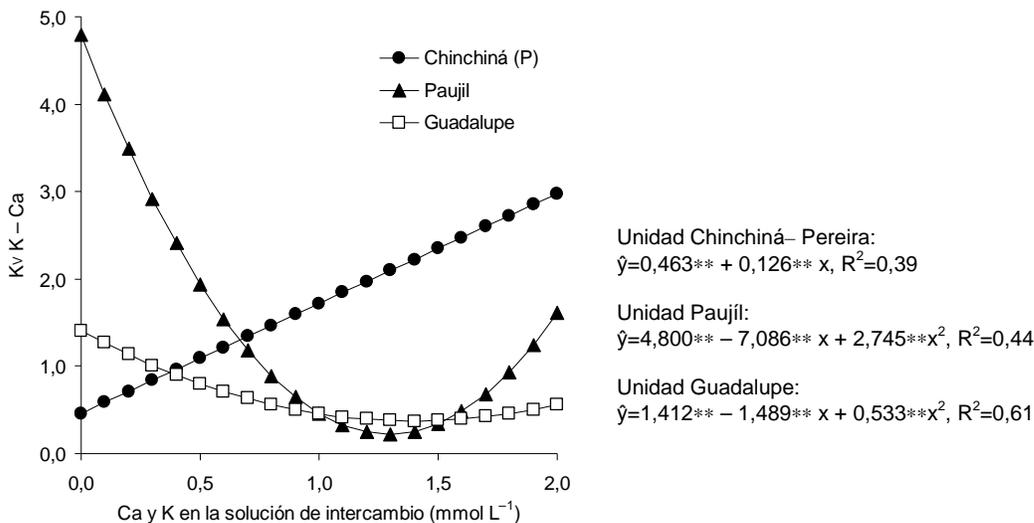


Figura 3-15. Variaciones del coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Ca ($K_V K-Ca$) en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio para tres de las unidades de suelos.

Por lo anterior, se concluye que en el ámbito general el aumento de la concentración de cationes en la solución de intercambio, o en su defecto la fuerza iónica, no influyó en la selectividad del intercambio K-Ca, pues de las 14 unidades de suelos evaluadas solo tres fueron influenciadas por esta variable, sin que el comportamiento fuese de todo claro. Se hubiera esperado una mayor preferencia por el K^+ al aumentar la fuerza iónica, dado que con el incremento en la concentración de las sales la fase de intercambio se vuelve más selectivo por los cationes de menor valencia (Essington, 2004).

3.1.5 Coeficientes de selectividad para el intercambio catiónico K–Mg

En la Tabla 3–7 se encuentran consignados los valores de coeficientes de selectividad de Vanselow para el intercambio K–Mg (K_V K–Mg). El rango promedio de los cuatro tratamientos varió entre 0,044 y 0,357, con el siguiente orden en las unidades de suelos: Doscientos–Sevilla < Suroeste < Chinchiná–Venecia < Chinchiná–Pereira < Salgar < Quindío < San Simón < Doscientos–Jamundí < Guadalupe < Timbío < Paují < Chinchiná–Chinchiná < Líbano < Fresno. Estos valores son muy bajos y señalan la preferencia del K^+ sobre el Mg^{2+} en todos los suelos estudiados. En el trabajo realizado por Loyola y Pavan (1989) –mediante la misma metodología empleada en este trabajo– se obtuvieron valores similares.

Las tendencias registradas en el intercambio K–Mg se asemejan mucho a las del K–Ca, pues en general se conserva el mismo orden en las unidades de suelo. Lo anterior se verificó a través de la correlación lineal entre estos dos coeficientes de selectividad (Figura 3–16).

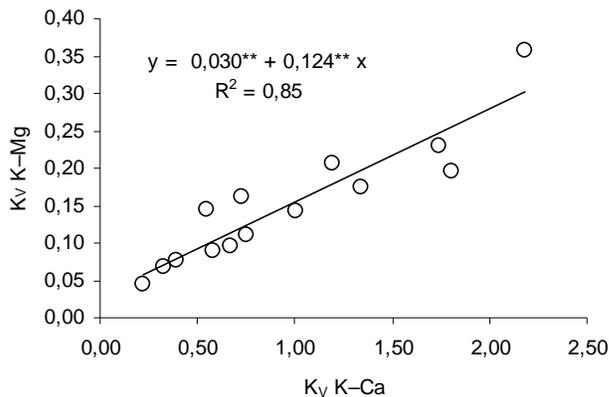


Figura 3–16. Correlación entre los coeficientes de selectividad de Vanselow para los intercambios K–Ca (K_V K–Ca) y K–Mg (K_V K–Mg). (n=14).

Para el intercambio K–Mg, los coeficientes de selectividad de Vanselow tendieron a reducirse con el aumento de la fracción equivalente de K^+ (\bar{E}_K), como medida que expresa la proporción relativa de los sitios de intercambio ocupados por el K^+ con respecto al Mg^{2+} ($\bar{E}_K = K^+ / (K^+ + Mg^{2+})$) (Figura 3–17). Este resultado sugiere que en aquellos suelos en los cuales la proporción de K^+ frente al Mg^{2+} tiende a ser mayor, existe preferencia por el primero elemento (valores más bajos de K_V para el intercambio K–Mg).

Dada la correlación entre los coeficientes de selectividad para los intercambios K–Ca y K–Mg, sumado al comportamiento de la preferencia por el K^+ como respuesta al incremento de su fracción equivalente $-\bar{E}_K-$ para los intercambios K–Ca y K–Mg, resulta razonable señalar que el comportamiento de la selectividad de los suelos por el K^+ con respecto al Mg^{2+} está gobernado en buena medida por los mismos factores que determinan el comportamiento de la selectividad del K^+ frente al Ca^{2+} . Por lo tanto, se puede relacionar de nuevo una parte de la preferencia por el K^+ en la unidad Doscientos en Sevilla con sus contenidos en minerales (potasio ciclo–trifosfato, $CaKP_3O_9$),

y en las unidades Quindío, Guadalupe y San Simón con las fracciones de anfibolita, ortoclasa y microclina, respectivamente.

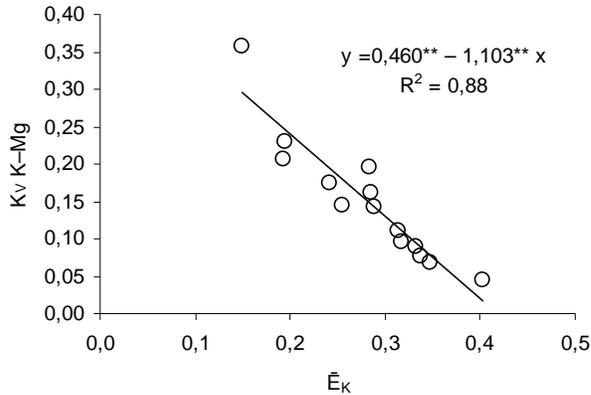


Figura 3-17. Coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Mg ($K_v \text{ K-Mg}$) en función de la fracción equivalente de K^+ (\bar{E}_K). (n=14).

Al igual que para el Ca^{2+} , se ha considerado que en general los suelos prefieren al Mg^{2+} sobre el K^+ ; señalamiento que se fundamenta en la mayor ocupación relativa del Mg^{2+} en los sitios de cambio, en respuesta a su mayor carga (Havlin et al., 1999; Navarro y Navarro, 2003; Bohn et al., 2001). Aunque los resultados obtenidos en esta investigación también corroboran que la cantidad de Mg^{2+} adsorbido por el complejo de cambio fue mayor que K^+ (Tabla 3-3), los coeficientes de selectividad aclaran que una vez establecido el equilibrio entre los contenidos de Mg^{2+} y K^+ en la solución y la fase sólida del suelo, existirá en este entonces preferencia del complejo adsorbente por el K^+ .

Basado en el anterior racionamiento, y mediante técnicas binarias y ternarias de intercambio, algunos investigadores también han demostrado la preferencia por el K^+ en lugar de Mg^{2+} en un amplio rango de suelos (Agbenin y Yakubu, 2006; Feigenbaum et al., 1991; Jensen, 1973; Udo, 1978). En cambio, en los trabajos desarrollados por Karmarkar et al. (1991) y Andrist et al. (2006) se reporta lo contrario.

Para Andisoles de la región central cafetera de Colombia, Henao y Delvaux (1998), hallaron diferencias entre los suelos en cuanto a su selectividad por el K^+ con respecto al Mg^{2+} . Tanto para la unidad Chinchiná en Chinchiná (Caldas) como la unidad Líbano hubo ausencia de adsorción selectiva por el K^+ en el horizonte A. Pese a las diferencias entre los resultados de Henao y Delvaux (1998) y los obtenidos en este trabajo, la tendencia relativa entre las unidades de suelo se conserva en cuanto a una menor selectividad por el K^+ en los suelos en referencia.

El análisis de varianza, al igual que para los intercambios Ca-Mg y K-Ca, indicó interacción de Unidad de suelos x Concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución de intercambio (Anexo C), lo cual señala que el comportamiento de los K_v en función de la fuerza iónica de la solución varió según el tipo de suelo. Al respecto, en las unidades Paujíl, Doscientos-Sevilla y Suroeste no se presentó ninguna tendencia; en Salgar y Guadalupe el modelo de mejor ajuste correspondió a la cuadrática y, para las demás unidades, fue el modelo lineal la que mejor explicó los cambios de K_v

en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio aplicadas a través de los tratamientos (Tabla 3–11).

Tabla 3–11. Ecuaciones de regresión correspondientes al coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para las unidades de suelo.

No.	U. Suelo	Ecuación	R ²
1	Líbano	$\hat{y}=0,11966^{**} + 0,11722^{**} x$	0,613
2	Chinchiná–Pereira	$\hat{y}=0,04896^{**} + 0,04420^{**} x$	0,866
3	Chinchiná–Chinchiná	$\hat{y}=0,10619^{**} + 0,10791^{**} x$	0,581
4	Chinchiná–Venecia	$\hat{y}=0,04683^{**} + 0,03194^{**} x$	0,676
5	Timbío	$\hat{y}=0,06030^{**} + 0,12272^{**} x$	0,688
6	Fresno	$\hat{y}=0,02245^{**} + 0,35679^{**} x$	0,418
7	Quindío	$\hat{y}=0,06858^{**} + 0,04474^{**} x$	0,698
8	San Simón	$\hat{y}=0,10976^{**} + 0,03495^{**} x$	0,570
10	Doscientos–Jamundí	$\hat{y}=0,09495^{**} + 0,05222^{**} x$	0,677
13	Salgar	$\hat{y}=0,10688^{**} - 0,08209^{**} x + 0,04979^{*} x^2$	0,534
14	Guadalupe	$\hat{y}=0,24581^{**} - 0,22045^{**} x + 0,09151^{**} x^2$	0,566

\hat{y} : Coeficiente de selectividad de Vanselow (K_V) estimado para el intercambio K–Mg, x: concentración de cationes en las soluciones de intercambio ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$).

*, ** significativo a 5 y 1% de probabilidad, según la prueba Tukey.

Entre aquellas unidades cuya tendencia fue lineal, la pendiente de la recta fue positiva, lo cual indica que la preferencia por el K^+ disminuye al incrementar su concentración en la solución de equilibrio; en este sentido, la unidad Fresno presentó la mayor pendiente (0,357), y se diferenció estadísticamente de las demás (Prueba Tukey al 5%); en un segundo grupo se logró reunir los suelos de Timbío, Líbano y Chinchiná–Chinchiná, y las unidades Doscientos–Jamundí, Quindío, Chinchiná–Pereira, San Simón y Chinchiná–Venecia conformaron el tercer grupo (Figura 3–18). Las nuevas ecuaciones, obtenidas mediante la metodología descrita por Little et al. (1996), se presentan en la Tabla 3–12, y en la Figura 3–19 el comportamiento general de estos modelos para el rango de los tratamientos aplicados.

En cuanto a las unidades de suelo en las que se registró una tendencia cuadrática, la prueba t indicó que las ecuaciones encontradas difieren en sus interceptos ($p < 5\%$), pero fueron iguales en la pendiente y curvatura. Como se puede observar en la Figura 3–20, los valores de K_V se redujeron con los primeros incrementos de las concentraciones, para luego incrementarse; tendencia que fue más notoria en la unidad Guadalupe. El modelo que representa a los dos suelos es: $\hat{y}=0,17634^{**} - 0,15127^{**} x + 0,07065^{**} x^2$. Pese a la significancia de los modelos cuadráticos obtenidos para las unidades Salgar y Guadalupe, el comportamiento no fue muy claro. En general se puede afirmar que para éstas, la reducción en la preferencia por el K^+ al incrementar la concentración de cationes en la solución de intercambio es diferente de las demás unidades.

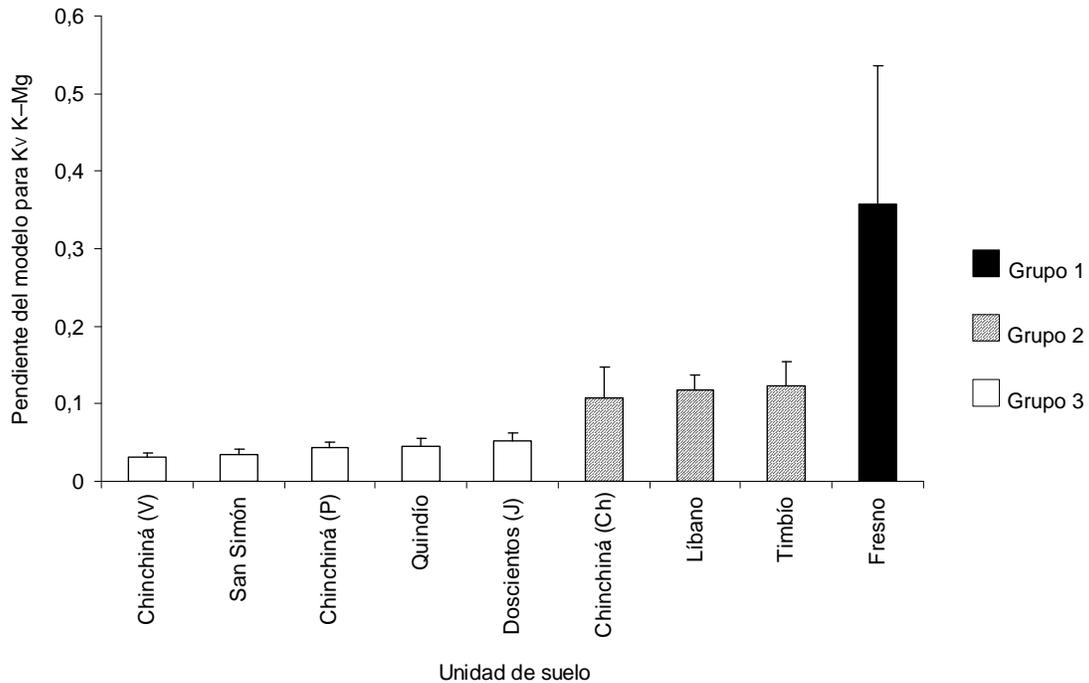


Figura 3–18. Pendientes de los modelos de regresión lineal para K_V K–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio. Las barras indican intervalos de confianza ($P < 5\%$).

Tabla 3–12. Nuevos modelos de regresión para K_V K–Mg en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio, obtenidos para nueve unidades de suelo.

No.	Unidad de suelo	Grupo	Ecuación
1	Líbano	2	$\hat{y}=0,12085^{**} + 0,02219^{**} x$
2	Chinchiná–Pereira	3	$\hat{y}=0,05139^{**} + 0,01719^{**} x$
3	Chinchiná–Chinchiná	2	$\hat{y}=0,09864^{**} + 0,02219^{**} x$
4	Chinchiná–Venecia	3	$\hat{y}=0,03777^{**} + 0,01719^{**} x$
5	Timbío	2	$\hat{y}=0,06664^{**} + 0,02219^{**} x$
6	Fresno	1	$\hat{y}=0,02246^{**} + 0,03844^{**} x$
7	Quindío	3	$\hat{y}=0,07151^{**} + 0,01719^{**} x$
8	San Simón	3	$\hat{y}=0,10352^{**} + 0,01719^{**} x$
10	Doscientos–Jamundí	3	$\hat{y}=0,10491^{**} + 0,01719^{**} x$

\hat{y} : Coeficiente de selectividad de Vanselow (K_V) estimado para el intercambio K–Mg, x: concentración de cationes en las soluciones de intercambio ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$).

** significativo a 1% de probabilidad, según la prueba Tukey.

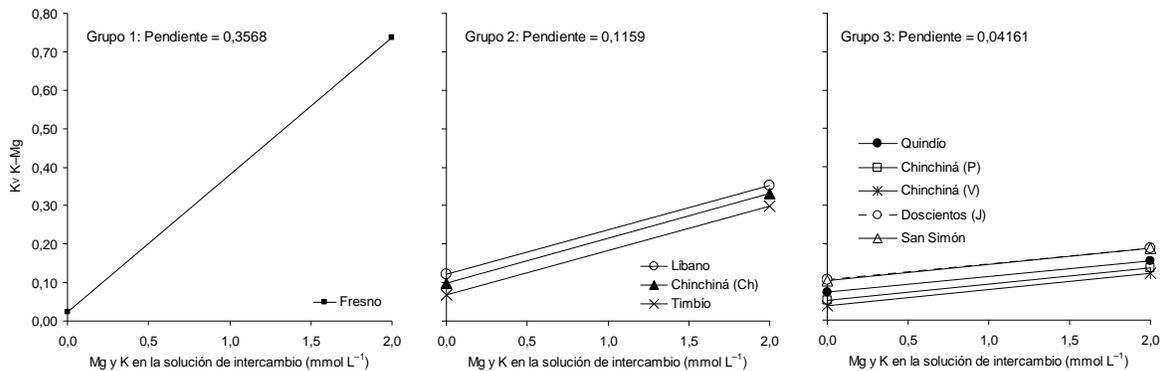


Figura 3-19. Agrupación de suelos por su similitud en los cambios de los coeficientes de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Mg (K_v K-Mg) en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio.

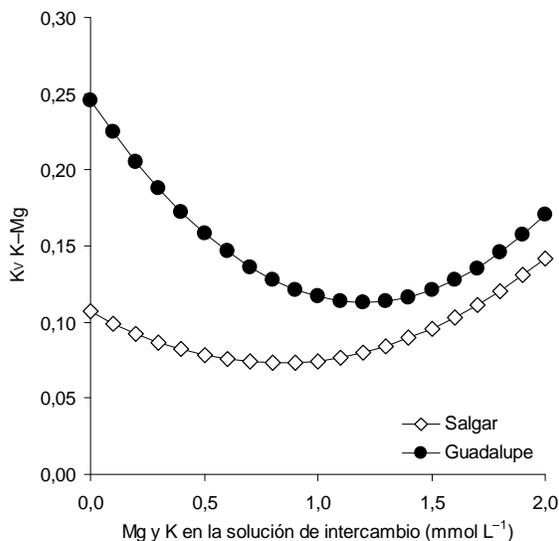


Figura 3-20. Variaciones del coeficiente de selectividad de Vanselow para el intercambio K-Mg (K_v K-Mg) en función de la concentración de cationes en las soluciones de intercambio para las unidades de suelos Salgar y Guadalupe.

De acuerdo con Bohn et al. (2001) el incremento en la concentración de la solución reduce la tendencia a que la difusión catiónica se efectúe lejos de la superficie coloidal, trayendo como consecuencia la contracción de la doble capa difusa. Además, el espesor de esta capa también varía inversamente con la raíz cuadrada de la concentración de sales de la solución o la valencia del catión intercambiable. Esta condición tiene diferentes consecuencia, entre las cuales está una mayor preferencia de los cationes monovalentes, por ejemplo el K^+ , sobre los bivalentes como el Mg^{2+} y Ca^{2+} (Esstington, 2004).

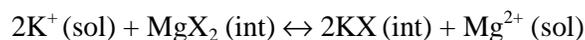
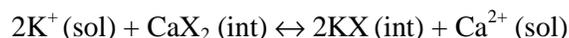
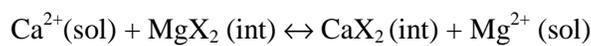
Basándose en lo anterior, se hubieran esperado aumentos en la preferencia por el K^+ en vez de Mg^{2+} con los incrementos en la fuerza iónica de las soluciones aplicadas a través de los tratamientos, lo cual solo sucedió de manera parcial en las unidades Salgar y Guadalupe. Puede notarse que en todos los Andisoles evaluados hubo reducción en la selectividad por el K^+ conforme a los incrementos de la fuerza iónica, y sólo dos suelos con propiedades no-ándicas (Doscientos en Jamundí y San Simón) presentaron este comportamiento, pero con pendientes muy bajas. Este hecho sugiere que para los Andisoles estudiados, los cambios en la concentración de las sales no tienen las mismas implicaciones que para los suelos con arcillas cristalinas, y que los aumentos generados en los coeficientes de selectividad K-Mg en respuesta a la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución de intercambio, estarían relacionados con otros factores como la mayor valencia del Mg^{2+} . Esta teoría también daría explicación al comportamiento del intercambio K-Ca, en cuyo caso para ninguno de los suelos con propiedades ándicas hubo aumento en la preferencia de K^+ al elevar la fuerza iónica de la solución.

Como resumen parcial se pueden resaltar los siguientes aspectos sobre el efecto de los tratamientos de intercambio: i) una vez aplicados los tratamientos de intercambio, en todos los suelos el Ca^{2+} se caracterizó por ser el catión predominante en la fase de cambio, seguido por el Mg^{2+} y K^+ , ii) los valores de la suma de estas bases, extraídas con $Ba(NO_3)_2$ 0,1 M, fueron inferiores a los de la CIC, determinados con Ac. Amonio 1,0 M a $pH=7,0$, evidenciando así la sobreestimación de esta en suelos de carga variable, iii) las relaciones Ca/Mg y Ca/K intercambiables disminuyeron con el incremento de las concentraciones empleadas, no así la relación Mg/K, iv) de acuerdo con la metodología empleada y los coeficientes de Vanselow (K_v), en todos los suelos hubo una fuerte preferencia de Ca^{2+} sobre el Mg^{2+} , y pese a que dicha selectividad disminuyó con el incremento de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución de intercambio, no dejó de manifestarse, v) la disminución en el pH de los suelos se tradujo en una reducción de la preferencia por el Ca^{2+} , favoreciendo la adsorción del Mg^{2+} , vi) los suelos derivados de cenizas volcánicas presentaron menores cambios en su selectividad por el Ca^{2+} frente al Mg^{2+} con el incremento de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución de intercambio, o su equivalente en la fuerza iónica vii) los coeficientes obtenidos para el intercambio K-Ca permitieron identificar dos grupos de unidades de suelos, uno con preferencia por el Ca^{2+} y el otro por el K^+ , viii) para la mayoría de los suelos el aumento de la fuerza iónica no afectó la selectividad del intercambio K-Ca, ix) todos los suelos evaluados fueron más selectivos por el K^+ antes que el Mg^{2+} , y fueron disímiles en su comportamiento con los aumentos de la fuerza iónica; sin que se dejara de manifestar la preferencia por el K^+ , x) sólo en algunos casos particulares se pudo relacionar la mineralogía, o en su defecto el origen de los suelos, con la selectividad catiónica.

3.1.6 Parámetros termodinámicos para los intercambios estudiados

En la Tabla 3-13 se consignan los parámetros termodinámicos de equilibrio para los intercambios Ca-Mg, K-Ca y K-Mg. Estos se calcularon de acuerdo con la metodología descrita por Sparks (2003) y Essington, (2004), y permiten tener una estimación global del efecto de los tratamientos en cada uno de los suelos estudiados.

Los intercambios en referencia corresponden en su orden a las siguientes reacciones:



La constante termodinámica de intercambio (K_{ex}) se calculó mediante: $\ln K_{\text{ex}} = \int_0^1 \ln K_v d\bar{E}_A$, y la energía libre estándar de intercambio de Gibbs ($\Delta G_{\text{ex}}^{\circ}$) a través de la siguiente fórmula (Essington, 2004; Sparks, 2003): $\Delta G_{\text{ex}}^{\circ} = -RT \ln K_{\text{ex}}$.

Tabla 3–13. Parámetros termodinámicos de equilibrio para los intercambios Ca–Mg, K–Ca y K–Mg.

No.	Unidad de suelo	— Intercambio Ca–Mg —			— Intercambio K–Ca —			— Intercambio K–Mg —		
		$\ln K_{\text{ex}}$	K_{ex}	$\Delta G_{\text{ex}}^{\circ}$ (kJ mol ⁻¹)	$\ln K_{\text{ex}}$	K_{ex}	$\Delta G_{\text{ex}}^{\circ}$ (kJ mol ⁻¹)	$\ln K_{\text{ex}}$	K_{ex}	$\Delta G_{\text{ex}}^{\circ}$ (kJ mol ⁻¹)
1	Líbano	-0,1359	0,873	33,098	-0,0118	0,988	2,869	-0,0827	0,921	20,149
2	Chinchiná–Pereira	-0,1369	0,872	33,348	0,0300	1,031	-7,308	0,0070	1,007	-1,583
3	Chinchiná–Chinchiná	-0,1436	0,866	34,972	-0,0038	0,996	930,000	-0,0136	0,987	3,317
4	Chinchiná–Venecia	-0,1429	0,867	34,803	0,0800	1,083	-19,457	0,2390	1,270	-58,261
5	Timbío	-0,0870	0,917	21,202	-0,0040	0,996	976,000	-0,0467	0,954	11,364
6	Fresno	-0,1319	0,877	32,121	-0,0016	0,998	396,000	-0,0337	0,967	8,212
7	Quindío	-0,1448	0,865	35,284	0,0160	1,017	-3,991	-0,0045	0,996	1,090
8	San Simón	-0,1231	0,884	29,990	0,0050	1,005	-1,288	-0,0172	0,983	4,190
9	Paujíl	-0,0691	0,933	16,826	-0,0038	0,996	926,000	-0,1502	0,861	36,592
10	Doscientos–Jamundí	-0,1452	0,865	35,372	0,0460	1,047	-11,241	0,0910	1,095	-22,081
11	Doscientos–Sevilla	-0,1155	0,891	28,140	0,1340	1,144	-32,71	-0,1912	0,826	46,577
12	Suroeste	-0,1091	0,897	26,580	0,0720	1,075	-17,571	-0,3549	0,701	86,444
13	Salgar	-0,1300	0,878	31,663	0,0300	1,030	-7,256	-0,0379	0,963	9,228
14	Guadalupe	-0,1487	0,862	36,213	0,0390	1,040	-9,538	0,0630	1,065	-15,384

Todos los valores de $\Delta G_{\text{ex}}^{\circ}$ para el intercambio Ca–Mg fueron positivos, resultado que indica que el proceso de intercambio no es espontáneo, es decir que se favorece la adsorción de Ca^{2+} . Este resultado concuerda con lo obtenido a través del coeficiente de selectividad de Vanselow (K_v), en el sentido de una mayor preferencia de los suelos evaluados para retener el Ca^{2+} .

Para las unidades Líbano, Chinchiná–Chinchiná, Timbío, Fresno y Paujíl el balance de energía para el intercambio K–Ca fue mayor que cero, es decir que hay una mayor preferencia por el Ca^{2+} que K^+ . En contraste, los valores de la energía libre de Gibbs ($\Delta G_{\text{ex}}^{\circ}$) fueron negativos para las demás unidades de suelos, lo cual indica preferencia de K^+ sobre el Ca^{2+} . Si se comparan estos resultados frente a los calculados anteriormente mediante el coeficiente de selectividad, las tendencias son las mismas.

Con respecto al intercambio de K–Mg, los valores de ΔG_{ex}° fueron negativos para las siguientes unidades: Chinchiná–Pereira, Guadalupe, Doscientos–Jamundí y Chinchiná–Venecia; lo cual indica que la reacción fue espontánea, y que por lo tanto existe preferencia por el Mg^{2+} antes que por el K^{+} . Este comportamiento difiere al obtenido anteriormente, pues los coeficientes de selectividad de Vanselow habían señalado que en todos los suelos existe preferencia de K^{+} por el Mg^{2+} . Lo anterior se debe a que en el cálculo de la constante de equilibrio se elimina el efecto de la fuerza iónica de la solución y de la saturación de bases para este intercambio en particular (Sparks, 2003).

Se concluye por lo tanto, que a excepción de algunos casos –específicamente para el intercambio K–Mg– los resultados obtenidos mediante los dos métodos son concordantes y complementarios.

3.1.7 Selección de suelos para la fase II

Una vez reunida la información sobre la selectividad y los parámetros termodinámicos asociados a los 14 suelos evaluados, se procedió a seleccionar tres para la segunda fase de la investigación. Para ello se tuvieron en cuenta tanto los valores promedios de K_V obtenidos en los cuatro tratamientos aplicados, como las diferencias en el comportamiento de los coeficientes de selectividad en función de la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en las soluciones de intercambio.

En la Tabla 3–14 se presentan en orden ascendente los valores promedio de los coeficientes de selectividad de Vanselow (K_V) para los tres intercambios catiónicos estudiados. En general, y como era de esperarse, las unidades de suelos con mayor selectividad por el Ca^{2+} , fueron menos selectivas por Mg^{2+} y K^{+} , y viceversa.

Tabla 3–14. Valores promedio de los coeficientes de selectividad de Vanselow (K_V) para los intercambios catiónicos estudiados, presentados en forma ascendente.

——— K_V Ca–Mg ———		——— K_V K–Ca ———		——— K_V K–Mg ———	
Paujíl	0,1245	Doscientos–Sevilla	0,2187	Doscientos–Sevilla	0,0443
Timbío	0,1268	Suroeste	0,3284	Suroeste	0,0680
Líbano	0,1314	Chinchiná–Venecia	0,3930	Chinchiná–Venecia	0,0768
Quindío	0,1497	Doscientos–Jamundí	0,5471	Chinchiná–Pereira	0,0904
Chinchiná–Pereira	0,1537	Chinchiná–Pereira	0,5807	Salgar	0,0960
San Simón	0,1553	Salgar	0,6670	Quindío	0,1105
Salgar	0,1555	Guadalupe	0,7246	San Simón	0,1425
Fresno	0,1580	Quindío	0,7490	Doscientos–Jamundí	0,1439
Chinchiná–Chinchiná	0,1715	San Simón	1,0046	Guadalupe	0,1607
Chinchiná–Venecia	0,1950	Chinchiná–Chinchiná	1,1938	Timbío	0,1754
Doscientos–Sevilla	0,1975	Timbío	1,3400	Paujíl	0,1947
Suroeste	0,2045	Líbano	1,7396	Chinchiná–Chinchiná	0,2074
Guadalupe	0,2392	Paujíl	1,8020	Líbano	0,2296
Doscientos–Jamundí	0,2658	Fresno	2,1816	Fresno	0,3569

Para el intercambio Ca–Mg, la unidad Timbío, además de ser uno de los dos suelos más selectivos por el Ca^{2+} (menor promedio del coeficiente de selectividad de K_V), exhibió un comportamiento diferente en respuesta a los cambios de la fuerza iónica. En este sentido, mientras el K_V en las otras unidades se incrementó de manera lineal con los aumentos en la fuerza iónica, en el suelo de Timbío el comportamiento de la respuesta se ajustó a un modelo cuadrático (Tabla 3–9).

Para los intercambios K–Ca y K–Mg, el suelo de la unidad Doscientos procedente de Sevilla fue el más selectivo por el K^+ . Es decir que en promedio presentó los menores coeficientes de selectividad de K_V . Aunque esta unidad no cambió sus coeficientes ante las variaciones de la fuerza iónica de las soluciones empleadas en estos dos intercambios, exhibió la mayor pendiente de la recta para K_V en función de la fuerza iónica en el intercambio Ca–Mg.

Con base en los anteriores resultados fue relativamente fácil escoger a las unidades Timbío y Doscientos–Sevilla debido a su preferencia por el Ca^{2+} y K^+ , respectivamente. Para la selección de una unidad de suelo con alta preferencia por el Mg^{2+} , los criterios establecidos no resultaron tan sencillos de aplicar, pues al considerar los dos intercambios en los que estaba involucrado (Ca–Mg y K–Mg), ninguna de las unidades mostró una clara preferencia. Dado que la unidad Chinchiná procedente de Chinchiná fue la más consistente en su selectividad por el Mg^{2+} en dichos intercambios, fue escogida para representar a los suelos con selectividad por este elemento.

3.2 Fase II. Efecto de las variaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre la nutrición y el crecimiento de café

Para evaluar los resultados de esta fase, inicialmente se analizará el efecto de los tratamientos sobre las propiedades de los suelos (fase sólida y líquida), el crecimiento de las plantas y la absorción de los nutrientes; posteriormente se determinará el efecto de dichas propiedades sobre las variables de respuesta.

Antes de abordar los anteriores puntos, se considera importante referirse de manera anticipada a ciertos aspectos que afectaron los resultados de la investigación; esto permitirá tener una visión general de esta fase de la investigación y así facilitar la comprensión del tema y la respectiva discusión. Mediante la aplicación de los tratamientos se logró modificar las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el suelo; sin embargo, y debido al efecto conjugado de las altas dosis empleadas y las fuentes solubles de fertilizantes seleccionadas, se generaron condiciones de salinidad, las cuales afectaron negativamente el crecimiento de las plantas. Es preciso recordar que las dosis seleccionadas para definir los tratamientos se basaron en resultados de investigaciones en torno a la materia, y las recomendaciones que se da actualmente para el manejo de la fertilidad del suelo tanto en Colombia como en otros países productores de café.

3.2.1 Cambios químicos generados en el suelo por el efecto de los tratamientos

En la Tabla 3–15 se presenta la información correspondiente a las propiedades químicas y físicas de los tres suelos seleccionados para la segunda fase del estudio (Unidades Chinchiná en Chinchiná, Timbío y Doscientos en Sevilla).

Tabla 3–15. Propiedades químicas y físicas de los suelos utilizados en la segunda fase de estudio el estudio*.

Propiedad	Unidad Chinchiná	Unidad Timbío	Unidad Doscientos
pH	4,80	4,90	5,30
CO (%)	7,83	14,04	4,06
N (%)	0,51	0,75	0,30
P (mg kg ⁻¹)	21,00	3,00	9,00
S (mg kg ⁻¹)	23,30	3,90	11,80
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,00	3,80	7,70
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	0,50	1,31	4,50
K (cmol _c kg ⁻¹)	1,56	1,72	1,91
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,04	0,02	0,04
Al (cmol _c kg ⁻¹)	1,10	0,90	0,30
Fe (mg kg ⁻¹)	191,00	315,00	279,00
Mn (mg kg ⁻¹)	18,00	35,00	83,00
Zn (mg kg ⁻¹)	4,00	9,00	9,00
Cu (mg kg ⁻¹)	7,00	3,00	20,00
B (mg kg ⁻¹)	0,46	0,25	0,54
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	20,00	28,00	23,00
CICE (cmol _c kg ⁻¹)	4,20	7,80	14,50
Ca/Mg	2,00	2,90	1,71
Ca/K	0,64	2,21	4,03
Mg/K	0,32	0,76	2,36
(Ca+Mg)/K	0,96	2,97	6,39
CICE (%)	21,00	27,68	62,83
Ar (%)	23,00	27,00	41,00
L (%)	29,00	32,00	25,00
A (%)	49,00	41,00	35,00
Textura	F	FAr	Ar
DA (g cm ⁻³)	0,76	0,54	0,96
Porosidad total (%)	67,76	73,46	63,20
**Macroporos (%)	20,84	29,30	20,25
**Mesoporos (%)	18,57	13,26	5,99
**Microporos (%)	28,35	30,91	36,96

* Corresponde a la caracterización inicial de los suelos, una vez recolectados.

** Determinados con mesa y platos de tensión.

DA: Densidad aparente

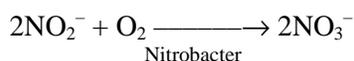
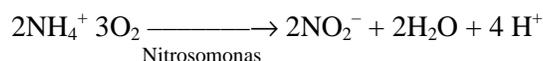
CICE: Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺+Na⁺+Al³⁺

3.2.1.1 Aspectos generales

En general, para los tres suelos se detectaron variaciones considerables entre los valores obtenidos en las muestras de suelos tomada para la primera fase del trabajo y la segunda; comportamiento que puede tener su origen en la variabilidad espacial de la fertilidad y en las prácticas de fertilización realizadas entre un muestreo y otro. Debido al volumen requerido para cada suelo – aproximadamente 1 m³– no fue posible tomar las muestras exactamente en los mismos sitios de la primera fase de la investigación sino en varios puntos cercanos a estos, dado que para ello se necesitó realizar una excavación de 4 m² a 25 cm de profundidad en la plantación. Para las unidades Chinchiná y Doscientos fueron más elevados los contenidos de Ca²⁺ y Mg²⁺ en el segundo muestreo, mientras que para Timbío ocurrió lo contrario; diferencias que estarían relacionadas básicamente con la alta variabilidad espacial en el lote. Los estudios desarrollados por Ochoa (2001) y Patiño (2005) en la zona cafetera Central de Colombia, señalan a estos elementos entre los de mayor variabilidad espacial. En las tres unidades de suelo hubo un incremento de K⁺ frente al primer muestreo, tendencia que se atribuyó tanto a la variabilidad espacial como a la aplicación de altas dosis de fertilizantes ricos en este elemento durante el período inmediatamente previo a la toma de las muestras. Las cantidades en referencia representan entre 240 y 300 kg ha⁻¹ año⁻¹ de K₂O (Sadeghian, 2008).

En la Tabla 3–16 se consignan los promedios y las desviaciones estándar para la conductividad eléctrica (C.E.), pH y los contenidos de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Al³⁺, correspondientes a los tratamientos en la unidad Chinchiná, y en las Tablas 3–17 y 3–18 se presentan los promedios obtenidos en las unidades Timbío y Doscientos, respectivamente.

Al comparar los valores iniciales de las propiedades del suelo (Tabla 3–15) con respecto a los finales (Tablas 3–16, 3–17 y 3–18), se puede apreciar que en todos los tratamientos, incluyendo el testigo que no recibió aportes de Ca²⁺, Mg²⁺ ni K⁺, el pH tendió a reducirse en las tres unidades, mientras que el Al³⁺ se incrementó. Estos cambios se atribuyen al efecto acidificante del amonio aplicado a los dos meses después del trasplante en forma de Fosfato diamónico. Cada ión de amonio (NH₄⁺) libera dos hidrogeniones –H⁺– en su proceso de nitrificación, de acuerdo con los siguientes pasos descritos por Havlin et al. (1999):



En una investigación que se llevó a cabo en la etapa de almácigo de café, Ávila et al. (2007) también detectaron aumentos en la acidez al emplear el DAP en un Inceptisol del departamento de Santander.

La unidad Chinchiná se caracterizó por ser la más desaturada, seguida por Timbío y Doscientos; este mismo orden se conservó para el porcentaje de saturación de bases con respecto a la CIC. La relación Ca/Mg presentó un rango de variación poco amplio; no así los demás cocientes, en cuyo caso la unidad Doscientos presentó los valores más altos y la Chinchiná los menores.

Tabla 3-16. Valores promedio de la conductividad eléctrica (C.E.), la acidez (pH y Al³⁺), y los contenidos de los cationes intercambiables en la unidad Chinchiná en respuesta a los tratamientos.

— Dosis —			— C.E. —		— pH —		— Ca ²⁺ —		— Mg ²⁺ —		— K ⁺ —		— Al ³⁺ —	
Ca	Mg	K	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.
— (g dm ⁻³) —			— (dS m ⁻¹) —		— (cmol _c kg ⁻¹) —									
0	0	0	1,54	0,40	3,90	0,18	1,43	0,28	1,10	0,12	0,96	0,12	2,55	0,30
0	0	1	2,10	0,40	4,08	0,05	1,43	0,21	1,55	0,54	4,13	0,75	2,65	0,26
0	0	3	2,80	0,47	4,18	0,10	1,18	0,13	1,25	0,23	6,25	0,49	2,58	0,22
0	1	0	2,42	0,20	4,20	0,08	1,30	0,14	8,96	0,64	1,01	0,19	2,50	0,36
0	1	1	3,31	0,34	4,23	0,05	1,40	0,22	9,44	1,59	4,06	0,34	2,58	0,17
0	1	3	4,66	0,65	4,25	0,06	1,30	0,08	8,70	1,62	7,96	1,14	2,25	0,42
0	3	0	5,13	1,34	4,33	0,05	1,18	0,10	22,60	3,70	1,11	0,15	2,15	0,37
0	3	1	4,72	2,15	4,33	0,10	1,38	0,43	25,36	7,38	4,40	1,08	2,13	0,54
0	3	3	5,47	1,26	4,28	0,05	1,10	0,14	19,70	3,07	7,53	1,11	2,25	0,21
1	0	0	2,01	0,12	4,13	0,05	10,45	1,77	1,07	0,28	1,04	0,22	2,33	0,17
1	0	1	2,77	0,86	4,13	0,05	12,33	2,17	1,22	0,35	3,63	0,80	2,18	0,22
1	0	3	3,27	0,36	4,20	0,00	9,93	1,38	1,18	0,29	7,31	1,17	2,23	0,39
1	1	0	2,83	0,13	4,18	0,05	9,23	0,95	8,33	0,88	0,94	0,18	2,28	0,46
1	1	1	3,80	0,45	4,20	0,08	9,85	0,87	8,54	1,36	3,84	0,47	2,60	0,14
1	1	3	5,10	0,37	4,25	0,06	9,45	1,00	9,54	1,06	9,35	0,72	2,23	0,28
1	3	0	5,24	0,55	4,28	0,10	10,05	0,87	23,28	6,74	1,18	0,45	2,55	0,41
1	3	1	5,41	0,62	4,28	0,10	9,05	1,55	24,10	4,68	4,04	0,85	2,25	0,19
1	3	3	5,71	1,13	4,30	0,12	9,25	1,18	20,38	6,19	7,91	1,89	2,15	0,17
3	0	0	2,07	0,10	4,08	0,05	26,63	3,98	1,05	0,22	0,83	0,12	2,50	0,22
3	0	1	3,14	0,69	4,13	0,05	24,13	1,98	1,29	0,08	4,84	0,94	2,18	0,38
3	0	3	4,03	0,29	4,15	0,06	24,70	1,70	1,42	0,16	9,36	0,70	2,33	0,29
3	1	0	2,92	1,06	4,15	0,10	22,98	5,51	9,10	0,81	0,95	0,07	2,58	0,10
3	1	1	3,82	0,25	4,20	0,00	25,55	4,23	9,78	0,67	4,14	0,25	2,48	0,37
3	1	3	4,86	0,42	4,28	0,05	22,35	2,14	8,99	0,90	9,23	1,02	2,38	0,26
3	3	0	5,03	0,05	4,30	0,00	22,38	1,59	29,60	1,56	1,24	0,19	2,15	0,37
3	3	1	3,96	1,32	4,23	0,10	24,20	2,27	21,80	3,86	3,75	0,41	2,45	0,30
3	3	3	6,25	0,85	4,25	0,06	20,78	1,54	23,43	5,19	7,83	0,90	2,28	0,21

Prom.: Promedio, D.E. desviación estándar

Tabla 3–17. Valores promedio de la conductividad eléctrica (C.E.), la acidez (pH y Al³⁺), y los contenidos de los cationes intercambiables en la unidad Timbío en respuesta a los tratamientos.

— Dosis —			— C.E. —		— pH —		— Ca ²⁺ —		— Mg ²⁺ —		— K ⁺ —		— Al ³⁺ —	
Ca	Mg	K	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.
— (g dm ⁻³) —			— dS m ⁻¹ —		— (cmol _c kg ⁻¹) —									
0	0	0	1,01	0,03	4,40	0,08	4,48	0,28	1,95	0,39	1,52	0,14	1,38	0,10
0	0	1	1,55	0,30	4,45	0,10	4,08	0,60	1,97	0,40	6,29	1,45	1,73	0,33
0	0	3	2,65	0,16	4,58	0,10	3,65	0,19	1,93	0,13	11,66	0,72	1,28	0,22
0	1	0	1,83	0,13	4,55	0,06	3,90	0,36	12,35	1,02	1,32	0,03	1,63	0,10
0	1	1	2,46	0,12	4,55	0,06	3,80	0,33	11,40	0,66	5,48	0,13	1,30	0,26
0	1	3	3,40	0,43	4,53	0,05	3,68	0,33	9,73	0,54	10,86	1,04	1,40	0,28
0	3	0	3,48	0,39	4,50	0,00	3,80	0,36	28,53	3,90	1,29	0,12	1,43	0,15
0	3	1	3,84	0,32	4,43	0,05	3,65	0,26	25,59	3,24	5,14	0,57	1,30	0,14
0	3	3	4,78	0,62	4,45	0,06	3,75	0,62	21,91	5,46	10,63	1,23	1,33	0,10
1	0	0	1,37	0,03	4,38	0,05	10,30	0,88	1,34	0,02	1,11	0,15	1,25	0,24
1	0	1	2,17	0,14	4,40	0,00	13,40	3,13	1,74	0,06	5,49	0,35	1,48	0,13
1	0	3	3,01	0,29	4,48	0,05	12,63	1,40	2,16	0,14	11,33	1,64	1,43	0,22
1	1	0	2,08	0,21	4,43	0,10	12,70	1,70	9,44	1,73	0,96	0,12	1,55	0,24
1	1	1	2,63	0,21	4,40	0,08	12,93	1,79	9,20	1,38	5,26	0,89	1,48	0,22
1	1	3	3,14	0,53	4,43	0,05	14,35	3,68	7,25	1,03	9,15	1,82	1,48	0,15
1	3	0	2,76	0,45	4,43	0,05	14,60	5,54	19,24	5,51	1,04	0,20	1,65	0,13
1	3	1	3,95	0,50	4,40	0,00	16,60	2,65	24,23	4,95	4,94	0,63	1,48	0,28
1	3	3	4,56	0,60	4,45	0,06	13,18	2,67	20,53	3,41	10,60	2,18	1,45	0,26
3	0	0	1,60	0,04	4,43	0,05	31,35	15,17	1,97	0,18	1,05	0,12	1,53	0,13
3	0	1	2,13	0,17	4,40	0,08	32,85	9,71	1,98	0,35	5,11	0,71	1,45	0,26
3	0	3	3,30	0,25	4,43	0,05	38,13	7,20	2,22	0,32	12,40	1,44	1,33	0,15
3	1	0	2,18	0,14	4,43	0,05	39,10	6,96	10,71	0,83	1,49	0,29	1,43	0,25
3	1	1	2,85	0,27	4,48	0,05	34,90	15,74	12,58	1,30	5,71	0,49	1,25	0,13
3	1	3	3,90	0,41	4,43	0,05	32,65	6,01	10,23	0,63	11,74	0,73	1,25	0,17
3	3	0	3,49	0,29	4,45	0,06	30,08	12,75	27,59	2,86	1,20	0,14	1,43	0,25
3	3	1	3,89	0,71	4,43	0,05	35,18	12,29	26,19	5,13	5,50	0,83	1,33	0,19
3	3	3	5,39	0,85	4,45	0,06	28,43	6,00	24,93	6,16	12,18	1,49	1,28	0,25

Prom.: Promedio, D.E. desviación estándar

Tabla 3–18. Valores promedio de la conductividad eléctrica (C.E.), la acidez (pH y Al³⁺), y los contenidos de los cationes intercambiables en la unidad Doscientos en respuesta a los tratamientos.

— Dosis —			— C.E. —		— pH —		— Ca ²⁺ —		— Mg ²⁺ —		— K ⁺ —		— Al ³⁺ —	
Ca	Mg	K	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.
— (g dm ⁻³) —			— dS m ⁻¹ —		— (cmol _c kg ⁻¹) —									
0	0	0	0,88	0,18	4,63	0,05	8,20	0,37	5,56	0,22	2,12	0,21	0,75	0,06
0	0	1	1,26	0,14	4,70	0,14	8,08	0,39	5,48	0,47	4,53	0,41	0,48	0,13
0	0	3	1,90	0,57	4,58	0,05	7,70	0,70	4,41	0,99	8,34	1,15	0,55	0,13
0	1	0	1,33	0,13	4,68	0,05	6,98	0,32	9,80	0,77	2,13	0,14	0,53	0,10
0	1	1	1,80	0,24	4,58	0,05	7,28	0,62	8,68	1,51	4,39	0,69	0,68	0,17
0	1	3	2,13	0,23	4,53	0,05	7,73	0,25	7,39	0,60	7,53	0,39	0,65	0,06
0	3	0	2,40	0,33	4,60	0,14	8,28	0,33	16,26	2,56	1,97	0,13	0,68	0,17
0	3	1	2,64	0,51	4,55	0,10	8,50	0,60	14,85	3,52	4,41	0,54	0,65	0,13
0	3	3	3,51	0,41	4,43	0,05	7,90	0,42	14,76	3,46	8,51	0,96	0,68	0,13
1	0	0	1,66	0,16	4,68	0,17	14,25	0,91	5,27	0,43	2,19	0,18	0,50	0,16
1	0	1	1,92	0,16	4,60	0,12	15,38	3,29	5,46	0,37	5,06	0,19	0,53	0,10
1	0	3	2,20	0,15	4,63	0,10	17,05	4,51	4,69	0,49	8,96	0,29	0,45	0,06
1	1	0	2,11	0,13	4,63	0,05	14,48	2,47	11,20	1,10	2,24	0,08	0,55	0,10
1	1	1	2,31	0,07	4,58	0,05	15,68	1,70	10,18	1,13	4,95	0,17	0,60	0,08
1	1	3	2,79	0,32	4,58	0,05	18,40	2,05	9,49	2,27	8,70	0,87	0,53	0,10
1	3	0	2,55	0,18	4,58	0,05	15,53	1,70	15,19	1,75	2,02	0,11	0,60	0,08
1	3	1	2,55	0,10	4,55	0,06	15,58	1,71	12,05	0,38	4,25	0,31	0,55	0,06
1	3	3	2,97	0,09	4,50	0,00	15,03	1,68	11,39	1,21	7,73	0,24	0,60	0,08
3	0	0	1,70	0,14	4,60	0,08	28,30	5,23	5,02	1,01	2,14	0,15	0,58	0,10
3	0	1	1,88	0,09	4,50	0,00	34,75	7,22	4,81	0,47	4,96	0,31	0,63	0,05
3	0	3	2,19	0,10	4,55	0,06	32,63	6,72	4,65	0,21	8,18	0,58	0,58	0,05
3	1	0	2,14	0,15	4,53	0,10	31,08	6,48	10,38	0,79	2,28	0,07	0,73	0,05
3	1	1	2,36	0,28	4,53	0,05	36,63	1,60	10,39	1,94	4,58	0,20	0,60	0,00
3	1	3	2,47	0,13	4,43	0,05	33,25	2,53	7,18	1,06	7,80	0,78	0,70	0,08
3	3	0	2,73	0,18	4,55	0,10	30,20	3,42	16,29	0,81	2,12	0,13	0,58	0,10
3	3	1	2,91	0,23	4,50	0,00	32,15	6,31	15,41	2,07	4,21	0,49	0,68	0,05
3	3	3	3,17	0,17	4,48	0,05	35,38	6,63	12,98	0,98	7,46	0,39	0,65	0,06

Prom.: Promedio, D.E. desviación estándar

En el tratamiento testigo, es decir sin la aplicación de Ca, Mg ni K, la conductividad eléctrica (C.E.) para las unidades Chinchiná, Timbío y Doscientos fue de 1,5 dS m⁻¹, 1,0 dS m⁻¹ y 0,9 dS m⁻¹, respectivamente. De acuerdo con los criterios generales establecidos para Colombia por el ICA (1992), estos valores son bajos, y se consideran normales para la zona cafetera del país, en donde las condiciones de clima (principalmente la precipitación), relieve y el origen de los suelos no favorecen la salinidad.

Conforme al aumento en las cantidades de los fertilizantes aplicados en los diferentes tratamientos se incrementó la C.E., dada la naturaleza química de estos materiales (sales). Si se consideran los promedios alcanzados por cada nutriente suministrado, resalta la menor influencia que tuvo el Ca²⁺ sobre esta variable en las tres unidades de suelo, en tanto que el Mg²⁺ y el K⁺ la afectaron más, especialmente en las unidades Chinchiná y Timbío (Figura 3–21). Los máximos valores de C.E. se lograron con las mayores dosis de los tres elementos, conservando la misma tendencia que los promedios, así: Doscientos: 3,17 dS m⁻¹, Timbío 5,39 dS m⁻¹ y Chinchiná 6,25 dS m⁻¹. De acuerdo con los criterios establecidos por Richards en el manual 60 de USDA (1954), y adoptado mundialmente hasta el día de hoy, se clasifica como salino aquella condición en la cual la C.E. sea igual o mayor a 4,0 dS m⁻¹; valor crítico para el cual se espera una reducción del 50% en la producción de la mayoría de los cultivos. García (2010) aclara que un suelo empieza a presentar problemas de sales cuando su C.E. es superior a 2 dS cm⁻¹, y añade que el límite de la clasificación como salino depende de la especie. Por lo tanto, y basándose en los resultados obtenidos, se puede afirmar que la aplicación de los tres elementos, en especial el Mg²⁺ y el K⁺, generó salinidad en los tres suelos conforme a las dosis suministradas, hasta alcanzar niveles que superan los valores críticos reportados. Las diferencias de la C.E. entre los tres nutrientes se relacionan directamente con las fuentes empleadas; en este sentido, el sulfato de Ca²⁺ presenta un bajo índice de salinidad (8,1) con respecto a los sulfatos de Mg y de K (46,1 y 44,0, respectivamente), tomando como referente al NaNO₃=100 (Guerrero, 2004).

Las diferencias detectadas en la C.E. entre los tres suelos están relacionadas con la habilidad de estos para retener las sales o permitir que drenen. Entre las propiedades que condicionan dicha habilidad, está la porosidad y la respectiva distribución relativa del tamaño de los poros (Amézquita, 2001). En los tres suelos el volumen de los espacios encargados del drenaje (macroporos), fue relativamente similar, en tanto que la fracción para retener el agua disponible para las plantas, representada por los mesoporos, fue menor en la unidad Doscientos (5,99%), con respecto a Timbío (13,26%) y Chinchiná (18,57%); diferencia que contribuyó a la salida del agua hacia el espacio exterior de las bolsas mediante los constantes riegos, reduciendo así la conductividad eléctrica y la concentración de los sulfatos como anión acompañante de las bases suministrados a través de los fertilizantes (Figura 3–22).

Los contenidos de las tres bases intercambiables se incrementaron conforme a las dosis suministradas, hasta alcanzar valores elevados que rara vez se detectan en los suelos de la región cafetera del país (Tablas 3–16, 3–17 y 3–18). La Figura 3–23 ilustra las variaciones de la CICE (Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺+Al³⁺), registradas para las tres unidades de suelos, en respuesta a las dosis aplicadas de Ca, Mg y K. Se presentaron incrementos conforme al aumento en las cantidades suministradas, alcanzando los máximos valores con las dosis más altas de los tres nutrientes, así: 55 cmol_c kg⁻¹ en Chinchiná, 57 cmol_c kg⁻¹ en Doscientos y 68 cmol_c kg⁻¹ en Timbío. Estos resultados son supremamente elevados y sugieren imprecisiones del método en su determinación. La razón para justificar lo anterior se fundamenta en el hecho que los valores de la CIC en los suelos objeto

de estudio (entre 20 y 28 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), fueron considerablemente inferiores a los de la CICE, lo cual no tiene sentido, pues la CIC estima la carga total intercambiable que puede presentar un suelo a pH 7,0, y la suma de los cationes que logran adherirse a esta fase no puede exceder dicha capacidad. Los estudios desarrollados en los diferentes suelos de la zona cafetera de Colombia coinciden en que la CICE normalmente presenta valores entre 3 y 10 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Cadena, 2004; Henao y Hernández, 2002; Sadeghian, 2003), a menos que se apliquen enmiendas con baja solubilidad como la cal (Díaz, 2006). Se concluye entonces que para esta condición en particular la cantidad extraída o recuperada por el método de laboratorio (Ac. Amonio 1N a pH 7,0) no corresponde en su totalidad a la intercambiable.

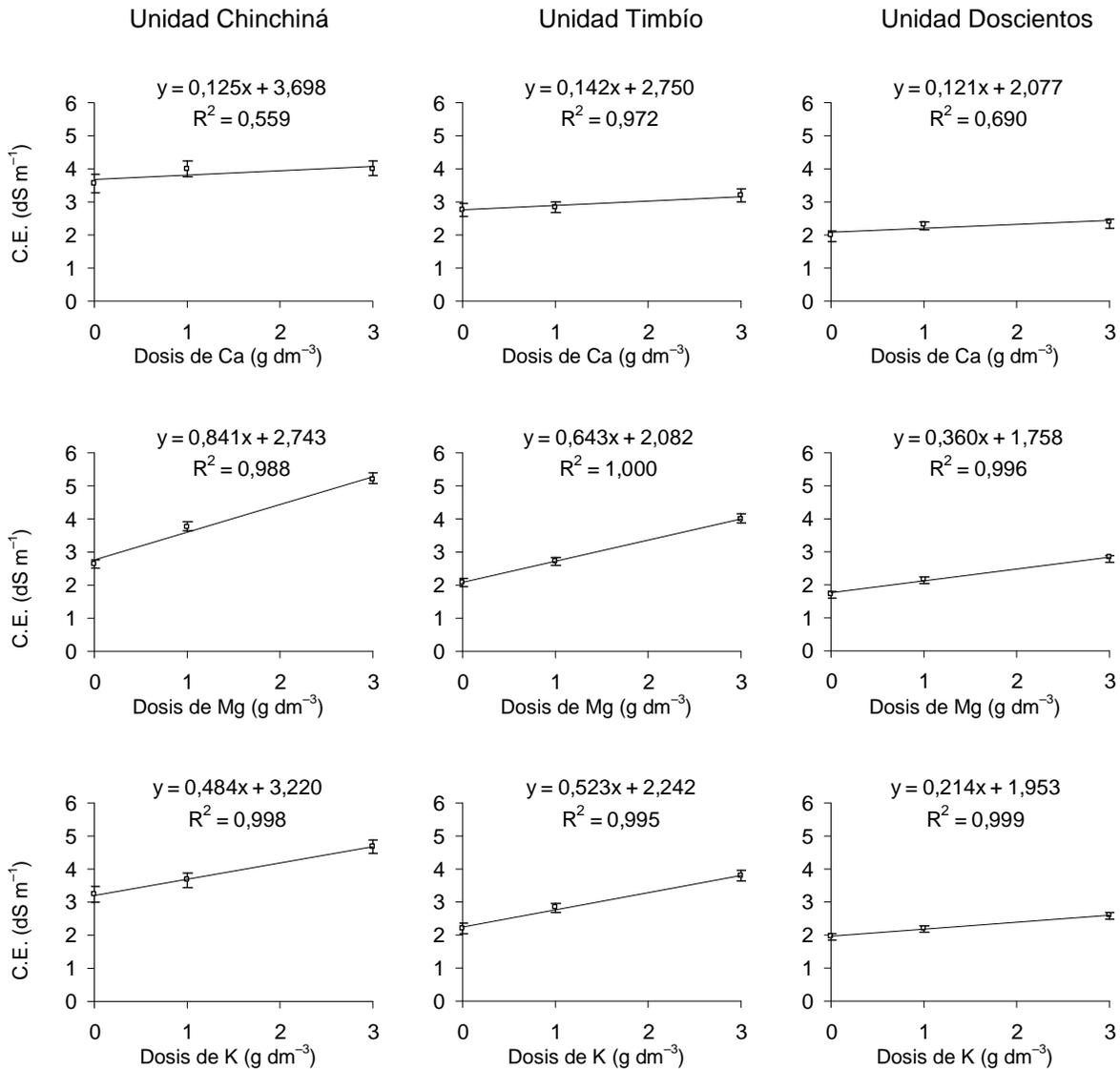


Figura 3–21. Conductividad eléctrica del suelo (C.E.) en respuesta a las dosis de Ca, Mg y K. El ajuste corresponde a los valores promedio. Las barras indican el error estándar.

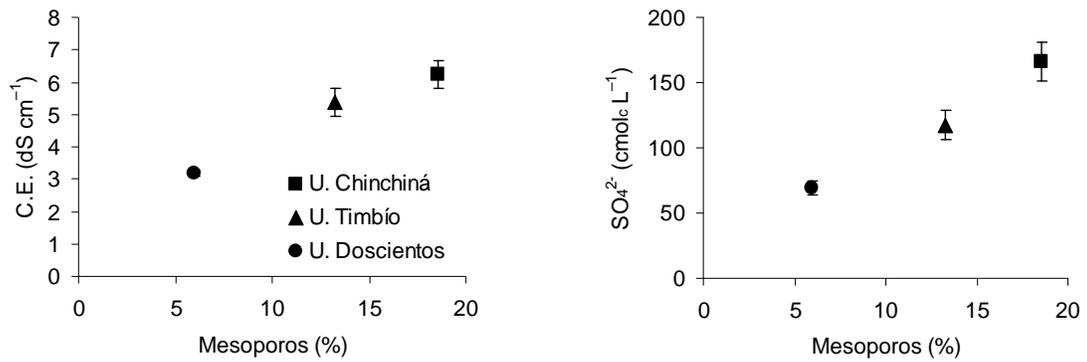


Figura 3–22. Conductividad eléctrica (C.E.) y concentración de sulfatos (SO_4^{2-}) en función de mesoporos. Las barras indican el error estándar.

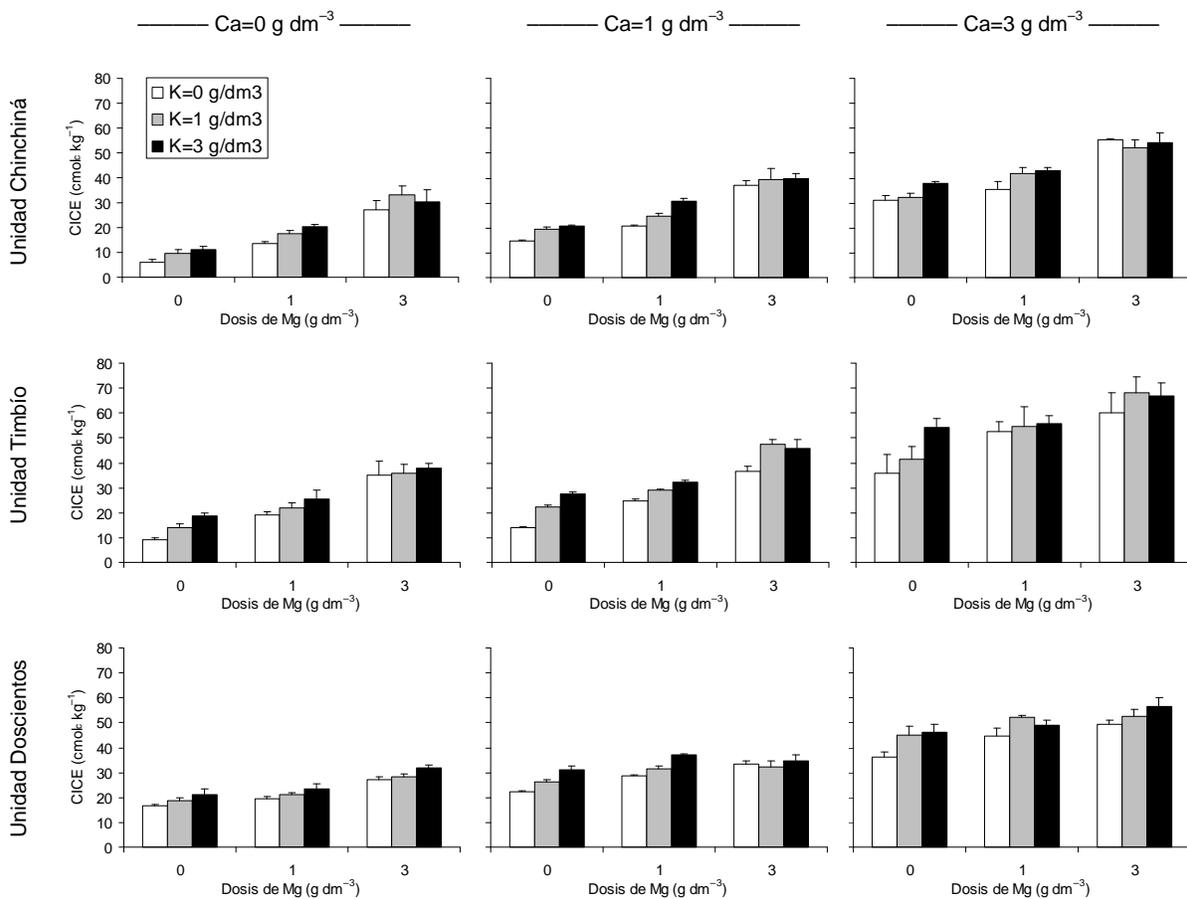


Figura 3–23. Variaciones de CICE en respuesta a las dosis de Ca, Mg y K. Las barras indican el error estándar.

La situación descrita también explica la elevada conductividad eléctrica, como resultado de la presencia de un exceso considerable de fertilizantes que se aplicaron a través de los tratamientos. Puesto que el excedente de los fertilizantes no se lavó durante el período de la incubación inicial de los suelos (20 días), ni en el transcurso de la fase de almácigo (seis meses), se puede concluir que no fue posible lograr que todas las cantidades aplicadas fueran retenidas en la fase intercambiable, quedando un exceso en la solución del suelo que se refleja en la C.E. Este aspecto es de suma importancia al momento de analizar el efecto de los tratamientos sobre la retención selectiva de los cationes en los tres suelos, ya que para la escogencia de estos se utilizó una metodología en la cual se determina la selectividad catiónica luego de lograr un equilibrio entre el contenido de los elementos en la solución y el complejo de cambio, lo cual no ocurrió.

Se ha demostrado que en suelos de carga variable, como los dos Andisoles y el Inceptisol seleccionados para esta investigación, la metodología que normalmente se emplea para la determinación de la CIC no es apropiada, pues sobreestima esta propiedad; lo anterior debido al uso de Ac. Amonio 1M a pH 7,0. Para evitar lo anterior se sugiere utilizar extractantes como cloruro o nitrato de bario, los cuales no modifican el pH original del suelo (Gillman y Fox, 1980; Fiantis *et al.*, 2002). Ahora bien, sabiendo que la valoración de la CIC se hizo mediante el uso de Ac. Amonio a pH 7,0, se espera en principio que los datos obtenidos mediante este método sean mayores que los reales (debido al incremento del pH original del suelo por el uso de una solución más alto que el del suelo); lo cual indica una diferencia aún más alta entre los valores de CIC y CICE. Al respecto, León (2001) hace un llamado de atención sobre el tema, indicando que en muchas ocasiones parte de la fracción llamada “*intercambiable*”, en realidad se encuentra en el suelo bajo otras formas diferentes a las que neutralizan las cargas negativas de los coloides órgano–minerales. Este autor menciona como un ejemplo de esta situación, la precipitación de carbonatos de Ca^{2+} y Mg^{2+} en algunos suelos del Valle del Cauca; así mismo, Sadeghian (2003) encontró que la aplicación reiterada de fertilizantes de baja solubilidad –por ejemplo el óxido de magnesio– puede generar una situación similar en suelos cafeteros de Colombia.

Como se mencionó anteriormente, dos de los tres fertilizantes utilizados en el experimento – Sulfatos de Mg y de K– son muy solubles, y pese a las aplicaciones constantes de riego durante los seis meses que duró la fase de invernadero –cada 2 ó 3 días– no fue posible lavar el exceso de los productos aplicados, quedando una porción importante de los nutrientes suministrados en el suelo, sin lograr un equilibrio con la fase intercambiable. La situación descrita puede asociarse básicamente con las altas dosis aplicadas. Por lo tanto, surge la pregunta ¿dónde se encuentran entonces estas bases? Se espera que efectivamente parte de ellas esté asociada al complejo de cambio, pero otra parte estaría en la matriz del suelo; tanto en la forma sólida como en la solución.

Si se considera la suma de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Al^{3+} en el tratamiento testigo –extraídos con Ac. Amonio 1M a pH=7,0– como el indicador de la capacidad real o efectiva del suelo (CICE), y sabiendo que no se presentó un incremento en el pH para aumentar esta capacidad, se puede pensar que aún con la dosis más baja de cualquiera de los elementos aplicados (1 g dm^{-3}) se estaría generando un excedente o residuo, dado que el valor de la CICE para este tratamiento supera al obtenido para el testigo.

La residualidad de los fertilizantes y enmiendas –cales y yeso– y la subsiguiente sobrevaloración de las bases intercambiables, ha sido uno de los problemas frecuentes, especialmente en los suelos ácidos, en donde es necesario corregir el pH y el Al^{3+} con productos poco solubles. Además, éste

inconveniente no solo ocurre cuando en el laboratorio se utiliza Ac. Amonio, pues Soratto et al. (2008), confirmaron que mediante la extracción con KCl, o a través de la metodología de la resina de intercambio, también se sobreestiman los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} al aplicar materiales encalantes y yeso. Por tal razón, Raij et al. (1982), proponen una metodología para determinar los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} no-intercambiables, como alternativa para estimar la cantidad remanente o residual de fertilizantes y enmiendas.

La Figura 3–24 ilustra el efecto de los tratamientos sobre los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , detectado como “intercambiables”, en las tres unidades de suelo. Los aumentos en el contenido de Ca^{2+} fueron similares o ligeramente mayores a los del Mg^{2+} en las unidades Chinchiná y Timbío, y casi tres veces más altos en la Doscientos; en cuanto al K^+ , los incrementos estuvieron por debajo de los de Ca^{2+} y Mg^{2+} para los tres suelos. Aún sabiendo que solo una parte de los estos elementos se encuentren en la fase de cambio, es necesario discutir las posibles causas que generan las variaciones tanto entre los elementos aplicados como entre los suelos. Las diferencias observadas entre elementos para una misma unidad de suelo se pueden atribuir a diversas causas, siendo la primera de ellas la cantidad equivalente del nutriente aplicada, es decir la dosis en términos de su peso equivalente (peso atómico/carga); racionamiento que se tuvo en cuenta para la fase I del estudio. En este caso, la cantidad de Mg fue 1,65 veces mayor que la del Ca^{2+} para una misma dosis (por ejemplo 1 g dm^{-3}), y 3,2 veces más que el K^+ ; en cuanto a los equivalentes de Ca^{2+} , se aplicaron 1,95 veces más que el K^+ . Al expresar el contenido de estas bases en función de los centimoles por kg aplicados, se modifican las tendencias observadas entre los tres cationes, más no entre suelos, lo cual se refleja en las pendientes de las rectas (Tabla 3–19). En Chinchiná el incremento registrado presentó el siguiente orden: $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ \approx \text{Mg}^{2+}$; en Timbío y Doscientos $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$.

Tabla 3–19. Modelos lineales que expresan los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ extraídos ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) en función de los centimoles de carga/kg aplicados.

Catión	Unidad Chinchiná	Unidad Timbío	Unidad Doscientos
Calcio	$y=1,80 + 1,48x$	$y=3,70 + 1,99x$	$y=7,66 + 1,66x$
Magnesio	$y=1,42 + 0,88x$	$y=2,32 + 0,89x$	$y=5,58 + 0,36x$
Potasio	$y=1,33 + 0,88x$	$y=1,60 + 1,25x$	$y=2,33 + 0,76x$

Una mayor tasa de incremento de Ca^{2+} (mayor pendiente de la recta), con respecto al Mg^{2+} y K^+ puede no solo atribuirse a su selectividad en virtud a la valencia y/o radio iónico hidratado (Bohn et al., 2001; Essington, 2004; Sparks, 2003), sino a la dificultad que tiene la fuente empleada para disolverse; en este sentido, la solubilidad del sulfato de Ca ($0,24 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) es 50 a 100 veces menor que los sulfatos de K y Mg respectivamente (Guerrero, 2004). A lo anterior se adiciona la facilidad que presenta el Ca^{2+} para precipitarse en presencia del ión sulfato y así permanecer en la matriz del suelo. En contraposición a lo anterior, una menor tasa en el incremento de Mg^{2+} se debe a la mayor solubilidad de la fuente empleada ($26 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) en comparación con sulfato de K ($12 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Se puede asumir entonces que las pérdidas por lixiviación del Mg^{2+} hayan sido mayores que los otros dos elementos.

De acuerdo con los reportes de Oliveira (1993), Böll y Nakagawa (1995) y Oliveira y Parra (2003), en ocasiones la solubilidad de las fuentes empleadas ejerce una marcada influencia sobre el contenido de las bases que se aplican, y por ende las relaciones entre ellas.

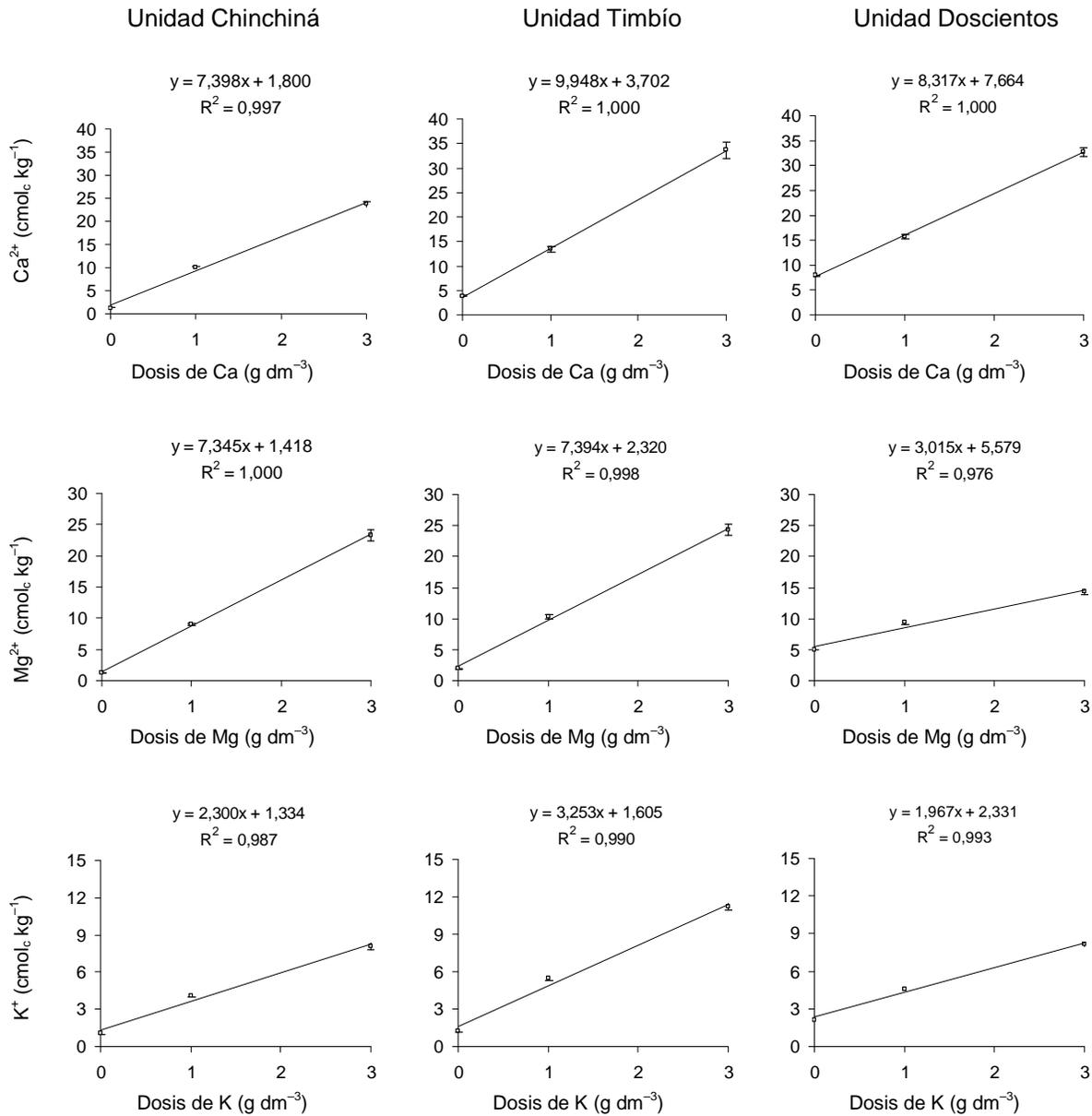


Figura 3–24. Variaciones promedio en los contenido de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ intercambiables, en respuesta a su aplicación. El ajuste corresponde a los valores promedio. Las barras indican el error estándar.

3.2.1.2. Efecto de los tratamientos en los coeficientes de selectividad

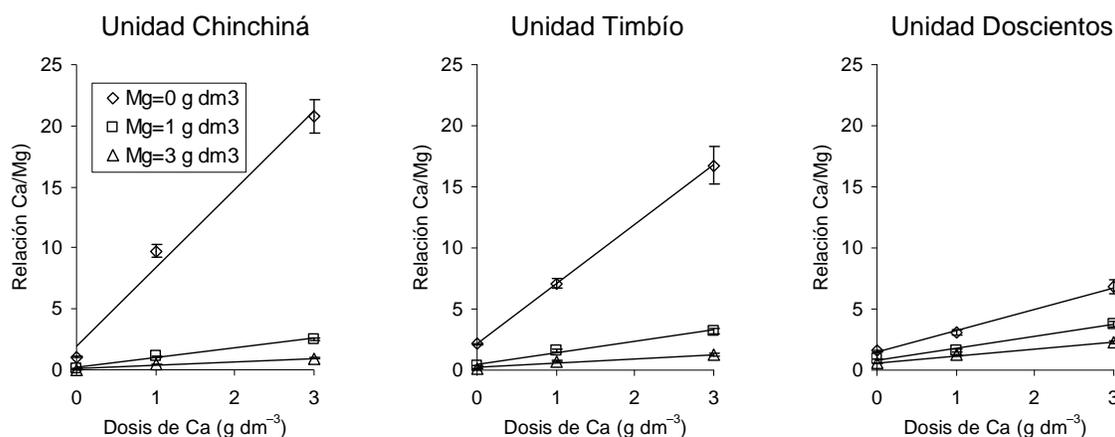
En cuanto a suelos se refiere, se espera que parte de las diferencias encontradas se deba a la naturaleza de los suelos como mecanismos de su selectividad catiónica; parámetro que no se pudo calcular debido a que los cationes en el complejo de cambio excedieron a la capacidad total adsorbente (CIC). Por lo tanto, sólo se puede hacer mención a una mayor habilidad de la unidad Timbío para retener el Ca²⁺ y la baja selectividad por el K⁺ de la unidad Chinchiná. Además, la menor capacidad de la unidad Doscientos para la retener Mg²⁺ y K⁺ pueden relacionarse con una

más baja habilidad para retener el agua en términos de mesoporos y la subsecuente pérdida de las fuentes más solubles.

Con base en lo anterior se deriva entonces que no tiene sentido calcular los coeficientes de selectividad, más aún cuando no se encontró relación entre la actividad de Ca^{2+} y su contenido en la fase intercambiable, como se discutirá más adelante.

3.2.1.3. Relaciones entre cationes intercambiables

En la Figura 3–25 se observan los cambios ocurridos en la relación de Ca/Mg intercambiables en cada uno de los suelos. Como era de esperarse, los valores más altos se obtuvieron con la máxima dosis de Ca (3 g dm^{-3}) en combinación con la menor dosis de Mg (0 g dm^{-3}); alcanzando cocientes que en general se consideran muy elevados en las unidades Chinchiná (20,7) y Timbío (16,8), y que de acuerdo con algunos autores podrían causar deficiencias de Mg^{2+} (Havlin et al.,1999; Navarro y Navarro, 2003). En la unidad Doscientos la relación más amplia fue cerca de tres veces menor que las anteriores (6,8), diferencia que antes de deberse a los contenidos Ca^{2+} , obedece a los mayores niveles nativos de Mg^{2+} (Tablas 3–16, 3–17 y 3–18). Una situación diferente a lo anterior se observó al aplicar cualquiera de las dosis de Mg, pues el comportamiento de la respuesta fue similar en los tres suelos; siendo ligeramente mayores los aumentos logrados en la unidad Doscientos.



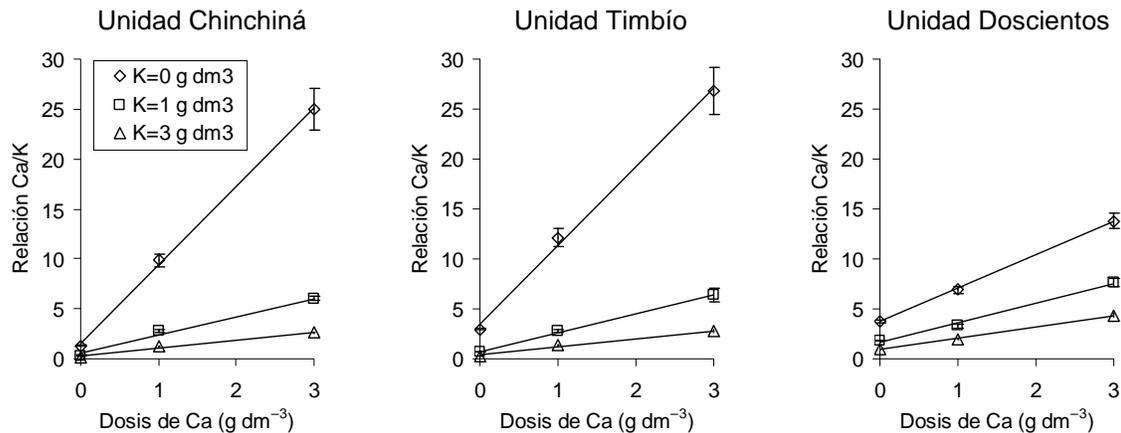
Se describen las ecuaciones de regresión de la relación Ca/Mg en función de las dosis de calcio para las tres dosis de magnesio.

Dosis de Mg (g dm^{-3})	Unidad Chinchiná		Unidad Timbío		Unidad Doscientos	
	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2
0	$y=1,985 + 6,404x$	0,985	$y=2,146 + 4,877x$	1,000	$y=1,475 + 1,755x$	0,997
1	$y=0,212 + 0,788x$	0,995	$y=0,467 + 0,933x$	0,987	$y=0,779 + 0,983x$	0,993
3	$y=0,092 + 0,286x$	0,988	$y=0,237 + 0,339x$	0,954	$y=0,597 + 0,554x$	0,995
Promedio	$y=0,763 + 2,493x$	0,987	$y=0,950 + 2,050x$	0,999	$y=0,950 + 1,097x$	0,998

Figura 3–25. Variaciones en las relaciones de Ca/Mg, como respuesta al suministro de calcio y magnesio. El ajuste corresponde a los valores promedio. Las barras indican el error estándar.

Para el cultivo de café se ha considerado como “adecuada”, “ideal” o “normal”, una relación de Ca^{2+} con respecto al Mg^{2+} entre 2 y 5 (Chaves, 2002; Valencia, 1999); esto supone que cocientes mayores afectan el crecimiento de las plantas. Sin la aplicación de Ca ni Mg dicha relación para los tres suelos se hallaba en el rango sugerido como el adecuado, o se alejaba muy poco de él (entre 1,5:1 y 2,2:1) (ver los interceptos de las ecuaciones correspondientes a la dosis 0 g Mg dm^{-3} , consignados en la Figura 3–25). Cuando no se aplicó Mg, con una baja dosis de Ca se pudo alcanzar una relación de 5:1 en las unidades Chinchiná (0,47 g dm^{-3} de Ca) y Timbío (0,59 g dm^{-3} de Ca); mientras que para la unidad Doscientos se necesitaron 2 g dm^{-3} . En contraposición a lo expuesto, al aplicar las dosis media y alta de Mg, no fue posible conseguir esta relación en ninguno de los suelos, aún al suministrar 3 g de Ca. Se considera que una relación Ca/Mg es invertida, siempre y cuando el cociente sea menor que la unidad (ICA, 1992), y se espera que bajo estas circunstancias se incremente la probabilidad de encontrar deficiencias de Ca^{2+} por el efecto competitivo de Mg^{2+} (Navarro y Navarro, 2003). Esta condición fue inducida en los tres suelos cuando se suministró Mg y no se aplicó Ca, o al adicionar 3 g dm^{-3} de Mg en combinación con 1 g dm^{-3} de Ca.

La Figura 3–26 ilustra los cambios de las relaciones de Ca/K, en respuesta a los tratamientos. En el ámbito general, y basándose en las pendientes de las rectas obtenidas, se puede afirmar que el comportamiento de esta variable en función de las cantidades de los dos elementos aplicados fue similar en los tres suelos, siendo la excepción la dosis más baja de K^+ en la unidad Doscientos; resultado que se debe a los mayores contenidos iniciales de este elemento.



Se describen las ecuaciones de regresión de la relación Ca/K en función de las dosis de calcio para las tres dosis de potasio.

Dosis de K (g dm^{-3})	Unidad Chinchiná		Unidad Timbío		Unidad Doscientos	
	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2
0	$y=1,595 + 7,838x$	0,999	$y=3,489 + 7,864x$	0,997	$y=3,702 + 3,352x$	0,999
1	$y=0,576 + 1,827x$	0,987	$y=0,763 + 1,895x$	0,999	$y=1,615 + 1,973x$	0,993
3	$y=0,261 + 0,792x$	0,990	$y=0,420 + 0,790x$	0,991	$y=0,920 + 1,138x$	0,999
Promedio	$y=0,811 + 3,486x$	0,997	$y=1,557 + 3,516x$	0,997	$y=2,079 + 2,154x$	0,998

Figura 3–26. Variaciones en las relaciones de Ca/K, como respuesta al suministro de calcio y potasio. El ajuste corresponde a los valores promedio. Las barras indican el error estándar.

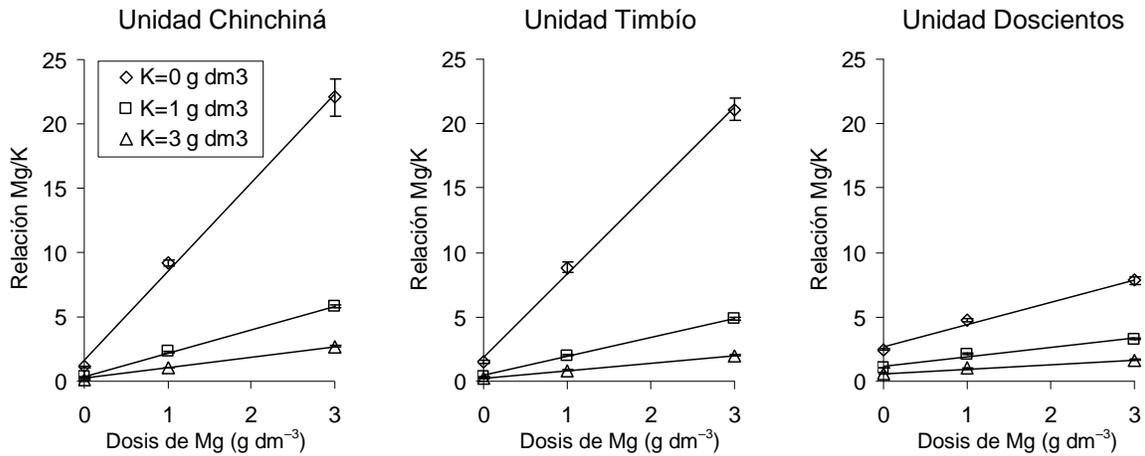
De acuerdo con Valencia (1999), una relación adecuada de Ca^{2+} con respecto a K^+ en café es de 6 a 1, y según Salamanca (1990), si esta relación excede a 30, se pueden presentar deficiencias de K^+ . En cuanto a la relación óptima se refiere, es decir 6, la condición inicial del suelo –tratamiento sin Ca ni K– estaba muy lejos de ella, especialmente en la unidad Chinchiná; siendo la principal causa el alto contenido de K^+ . Ahora bien, para lograr este valor fue necesario aplicar las siguientes dosis de Ca, sin adición de K: unidad Chinchiná $0,56 \text{ g dm}^{-3}$, Timbío $0,32 \text{ g dm}^{-3}$ y Doscientos $0,69 \text{ g dm}^{-3}$. Cuando se aplicó la dosis media de K (1 g dm^{-3}) sólo fue posible alcanzar una relación de 6 con altas dosis de Ca ($2,97 \text{ g dm}^{-3}$ en Chinchiná, $2,76 \text{ g dm}^{-3}$ en Timbío y $2,22 \text{ g dm}^{-3}$ en Doscientos), mientras que al suministrar 3 g dm^{-3} de K, no se pudo lograr dicha relación. El anterior panorama puede ocurrir frecuentemente en los suelos de la zona cafetera de Colombia, donde casi siempre aplican altas cantidades de K (generalmente cerca de 300 kg de K_2O por ha).

Con respecto al valor crítico señalado, es decir 30, para el caso de este estudio no se alcanzó, dado básicamente los elevados contenidos de K^+ en los suelos objeto de estudio. Cabe resaltar que se esperaban valores más altos que los obtenidos (casi el doble); sin embargo, y debido a que los niveles iniciales de K^+ eran elevados al iniciar el experimento, sólo fue posible alcanzar cocientes similares a los de la relación Ca/Mg (inferiores a 30).

En la Figura 3–27 se puede observar el efecto de la aplicación de Mg y K sobre la relación de estos cationes en el suelo. En la unidad Chinchiná las pendientes de las rectas obtenidas fueron las más altas; así mismo, los valores máximos alcanzados en las diferentes combinaciones evaluados. Para el suelo de la unidad Timbío se encontraron tendencias similares pero ligeramente de menor magnitud; distinguiéndose así de la Doscientos.

Para las condiciones de Colombia, el ICA (1992) considera como “normal” una relación de Mg/K igual a 4 y Estrada (2001) califica como condición desfavorable para el Mg^{2+} , un cociente menor a la unidad. Salamanca (1990) indica que una relación mayor a 18 puede inducir deficiencias de K^+ en los diversos cultivos. En los tratamientos que no se aplicó Mg, con el suministro de K se alcanzaron valores menores o muy próximos a 1, en tanto que con la dosis de 1 g dm^{-3} de Mg fue posible reducir la relación hasta la unidad sólo cuando se aplicaron 3 g dm^{-3} de K. En la unidad Timbío la máxima relación alcanzada fue 7,8, mientras que en las otras dos unidades se logró sobrepasar el límite de 18.

La Figura 3–28 muestra los cambios de la relación de $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ en respuesta al suministro de los tres nutrientes. Como era de esperarse, conforme a los incrementos en las dosis de Ca y Mg, y a la reducción en la cantidad suministrada de K, se aumentaron los valores de este cociente. Las mayores pendientes se obtuvieron cuando no se aplicó el K, especialmente en las unidades Chinchiná y Timbío, básicamente debido a los mayores contenidos de Mg^{2+} . Se logró elevar la relación $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ hasta 48 en suelo de Timbío y 43 en Chinchiná, mientras que en Doscientos sólo se llegó a 22; resultado que demuestra una respuesta diferencial de los suelos en retener las bases, sin que se pueda confirmar que en su totalidad correspondan a la fase de cambio. Tanto para café (Valencia, 1999), como para otros cultivos en Colombia (ICA, 1992), se propone como una relación normal valores entre 8 y 16, en tanto que cocientes mayores a 40 pueden sugerir deficiencias de K (Salamanca, 1990); valor último que no se logró en este estudio, aún con las dosis más elevadas de Ca y Mg. Cabe resaltar que el comportamiento de esta variable fue similar para las tres unidades de suelo cuando se suministró K, bien sea 1 ó 3 g dm^{-3} ; además, se redujo notoriamente el valor máximo alcanzado (inferior a 13).



Se describen las ecuaciones de regresión de la relación Mg/K en función de las dosis de magnesio para las tres dosis de potasio.

Dosis de K (g dm ⁻³)	Unidad Chinchiná		Unidad Timbío		Unidad Doscientos	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
0	$y=1,603 + 6,898x$	0,997	$y=1,825 + 6,490x$	0,998	$y=2,663 + 1,755x$	0,990
1	$y=0,387 + 1,827x$	0,999	$y=0,412 + 1,496x$	0,998	$y=1,206 + 0,713x$	0,979
3	$y=0,176 + 0,847x$	1,000	$y=0,209 + 0,605x$	0,998	$y=0,576 + 0,363x$	0,992
Promedio	$y=0,722 + 3,191x$	0,998	$y=0,815 + 2,864x$	0,998	$y=1,481 + 0,943x$	0,988

Figura 3–27. Variaciones en las relaciones de Mg/K, como respuesta al suministro de magnesio y potasio. El ajuste corresponde a los valores promedio. Las barras indican el error estándar.

Como se discutió anteriormente, el hecho que la CICE haya sido considerablemente mayor que la CIC, pone en evidencia que sólo una parte de los tres nutrientes aplicados se encuentra asociada a la fase intercambiable, y que el resto necesariamente debe encontrarse en la matriz del suelo bajo otras formas, tales como ión libre o par iónico en la solución, o en forma precipitada con los diferentes aniones presentes, principalmente sulfatos, dada la fuente fertilizante empleada. Si lo expuesto es cierto, es preciso entonces establecer el siguiente interrogante sobre los resultados encontrados: ¿en situaciones como ésta, tendrá sentido hablar de las relaciones entre las “bases intercambiables”, cuando éstas no se encuentran en el complejo de cambio?

En el caso que estas relaciones realmente correspondan a la fracción intercambiable, supuesto que no es cierto, se destaca la respuesta diferencial de los suelos en dejarse modificar tanto el contenido de cualquiera de las tres bases como las relaciones entre ellas.

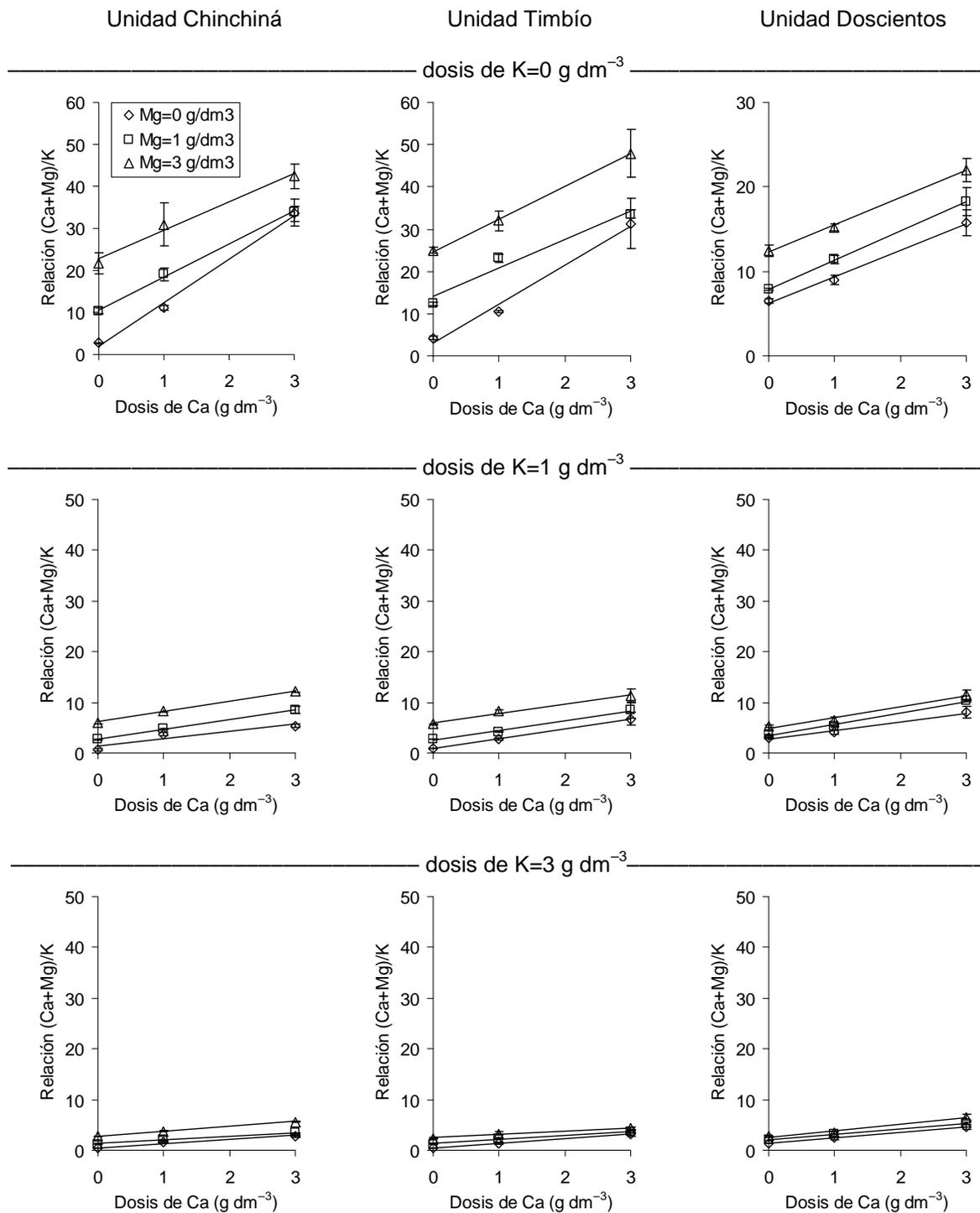


Figura 3–28. Variaciones en las relaciones de (Ca+Mg)/K intercambiables, como respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio.

Se describen las ecuaciones de regresión de la relación (Ca+Mg)/K en función de las dosis de calcio, para las tres dosis de magnesio y potasio.

Dosis de Mg (g dm ⁻³)	Unidad Chinchiná		Unidad Timbío		Unidad Doscientos	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
	K=0 g dm ⁻³					
0	y=1,898 + 10,405x	0,996	y=3,106 + 9,189x	0,988	y=6,260 + 3,121x	0,994
1	y=10,689 + 7,781x	0,998	y=13,965 + 6,804x	0,960	y=7,938 + 3,441x	1,000
3	y=22,705 + 6,750x	0,985	y=24,704 + 7,695x	0,999	y=12,290 + 3,212x	0,998
Promedio	y=11,764 + 8,312x	1,000	y=13,925 + 7,896x	1,000	y=8,829 + 3,258x	0,999
	K=1 g dm ⁻³					
0	y=1,364 + 1,457x	0,873	y=0,913 + 1,950x	0,999	y=2,768 + 1,719x	0,986
1	y=2,741 + 1,956x	0,999	y=2,593 + 1,918x	0,993	y=3,375 + 2,257x	0,989
3	y=6,107 + 2,058x	0,999	y=5,981 + 1,834x	0,981	y=4,947 + 2,108x	0,981
Promedio	y=3,404 + 1,824x	0,985	y=3,163 + 1,901x	1,000	y=3,697 + 2,028x	0,986
	K=3 g dm ⁻³					
0	y=0,534 + 0,784x	0,975	y=0,438 + 0,940x	0,999	y=1,419 + 1,057x	0,999
1	y=1,281 + 0,716x	0,999	y=1,376 + 0,787x	0,977	y=2,068 + 1,051x	0,998
3	y=2,774 + 0,958x	1,000	y=2,489 + 0,644x	0,983	y=2,435 + 1,317x	0,980
Promedio	y=1,530 + 0,819x	0,996	y=1,434 + 0,790x	0,995	y=1,974 + 1,142x	0,998

El ajuste corresponde a los valores promedio. Las barras indican el error estándar.

Continuación Figura 3–28. Variaciones en las relaciones de (Ca+Mg)/K intercambiables, como respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio.

3.2.2 Cambios químicos generados en la solución del suelo en respuesta a los tratamientos

En la Tabla 3–20 se consignan los promedios y las respectivas desviaciones estándar de las concentraciones de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en la solución del suelo para cada uno de los tratamientos y unidades de suelos. Las concentraciones de Mg²⁺ y K⁺ se incrementaron conforme a las dosis aplicadas, siendo menores los valores obtenidos en la unidad Doscientos; en cuanto al Ca²⁺, el aumento en su concentración se vio reflejado básicamente con la primera dosis, sin que se presentara una diferencia marcada en el comportamiento de los suelos (Figura 3–29). Los valores promedio obtenidos para el Mg²⁺ fueron los más altos, seguido por el K⁺ y el Ca²⁺, en tanto que la participación de Na⁺ y amonio (NH₄⁺) fue muy baja (Figura 3–30), resultado que se relaciona con factores ya discutidos, entre ellos: la cantidad equivalente de los elementos aplicados, la solubilidad de las fuentes fertilizantes, la capacidad del ión para disociarse y su selectividad.

De acuerdo con Wolt (1994), los suelos típicamente pueden contener entre 10⁻⁴ y 10⁻² mol L⁻¹ de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺. Las concentraciones detectadas en este estudio superan significativamente dichos valores y los hallados en Colombia, tanto para cafetales sin fertilización (Henao y Hernández, 2002) como cultivos fertilizados con estos elementos (Cadena, 2004), revelando así la ocurrencia de condiciones poco frecuentes.

Tabla 3–20. Valores promedio de la concentración de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en la solución de los suelos en respuesta a los tratamientos.

— Dosis —			Unidad Chinchiná						Unidad Timbío						Unidad Doscientos					
Ca	Mg	K	— Ca ²⁺ —		— Mg ²⁺ —		— K ⁺ —		— Ca ²⁺ —		— Mg ²⁺ —		— K ⁺ —		— Ca ²⁺ —		— Mg ²⁺ —		— K ⁺ —	
			Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.
— (g dm ⁻³) —			(cmol _c L ⁻¹)																	
0	0	0	10,04	3,23	9,45	1,84	5,43	1,33	14,27	2,27	7,07	1,33	5,67	1,77	14,30	9,12	11,83	7,52	2,81	1,46
0	0	1	3,45	1,14	5,28	1,67	12,48	6,78	11,74	4,59	6,97	3,26	22,75	8,15	13,98	3,54	11,56	3,15	8,24	2,96
0	0	3	7,84	3,80	8,27	4,50	44,97	25,47	17,15	4,85	12,17	3,62	72,02	16,11	21,80	8,83	18,13	12,53	27,77	12,33
0	1	0	7,14	4,22	61,50	33,92	4,42	2,58	18,49	3,74	74,44	22,03	4,30	0,66	25,03	6,72	46,22	14,63	3,54	0,65
0	1	1	10,26	5,09	80,38	37,33	28,78	12,26	22,38	3,14	90,77	17,52	32,42	3,98	28,76	7,40	58,76	29,85	15,90	5,81
0	1	3	11,56	7,39	128,64	115,67	76,87	50,60	9,31	7,36	33,86	24,44	33,35	24,75	18,45	1,26	25,10	5,48	18,50	2,20
0	3	0	10,02	2,02	260,11	132,56	8,58	1,55	22,10	2,96	255,81	66,35	5,98	1,23	15,06	2,91	41,94	7,69	2,66	0,47
0	3	1	13,78	2,51	380,77	100,27	45,00	10,35	19,34	1,84	193,40	27,87	28,90	2,61	23,76	7,58	84,24	48,81	12,73	5,70
0	3	3	10,05	3,45	245,78	101,58	79,94	27,21	22,58	1,80	216,54	62,13	80,40	10,05	26,61	1,39	159,61	87,80	44,40	14,18
1	0	0	43,39	10,23	13,81	4,38	6,77	1,29	41,90	6,86	7,36	2,21	4,08	2,31	32,43	6,82	15,62	3,78	3,25	0,75
1	0	1	30,61	13,93	48,42	65,75	41,16	27,92	30,79	12,16	7,59	3,50	22,82	10,88	27,30	17,69	16,95	11,31	10,16	6,72
1	0	3	25,17	14,31	9,21	3,47	58,48	20,64	21,30	13,66	8,34	5,45	47,89	34,92	31,57	4,81	27,67	14,37	35,87	11,85
1	1	0	29,47	14,59	98,80	51,87	15,90	16,86	25,00	10,19	35,24	16,42	2,19	1,01	33,93	7,58	82,94	45,52	4,35	1,41
1	1	1	20,27	12,36	72,58	47,98	27,61	17,91	27,60	4,96	54,88	13,65	26,62	3,06	30,82	1,02	69,76	4,43	14,33	0,53
1	1	3	27,31	4,13	109,72	22,30	82,86	31,76	23,04	9,69	49,99	20,50	59,07	21,89	30,92	4,13	53,58	23,39	32,14	6,73
1	3	0	28,90	1,68	212,79	70,85	17,73	15,96	29,73	2,49	118,10	20,75	3,83	0,76	29,64	1,13	124,65	8,58	4,51	0,44
1	3	1	16,58	7,83	174,45	68,70	28,11	12,52	19,38	12,27	126,71	83,33	20,82	13,22	27,72	1,62	77,31	50,78	11,28	2,18
1	3	3	15,61	5,15	166,22	87,09	58,26	30,55	20,08	8,61	103,15	37,84	47,22	7,09	32,62	10,74	88,85	24,64	31,13	8,62
3	0	0	28,42	16,31	4,04	2,37	2,59	0,96	54,10	4,13	9,85	1,77	2,79	0,82	40,91	5,76	20,06	7,66	3,54	0,62
3	0	1	36,46	18,92	11,55	5,63	39,86	18,88	44,31	3,66	10,06	1,58	22,34	3,47	35,14	13,53	23,01	9,71	13,33	4,68
3	0	3	22,34	13,02	12,14	6,81	79,54	39,45	33,11	0,89	16,35	2,78	96,07	17,86	24,94	12,90	18,85	8,61	24,07	9,33
3	1	0	24,72	16,84	82,83	61,94	5,16	3,65	21,05	13,09	54,02	52,43	5,08	4,86	35,85	0,36	58,75	13,28	4,76	0,59
3	1	1	25,14	6,81	91,57	47,83	33,75	15,66	27,77	12,00	66,04	28,47	23,51	9,51	27,23	7,16	42,48	14,07	10,97	3,51
3	1	3	19,48	11,70	83,93	52,63	77,03	46,00	26,66	0,42	79,51	12,47	79,32	4,06	31,82	1,28	54,75	19,31	25,26	10,29
3	3	0	20,98	8,88	218,44	84,98	7,18	3,20	24,75	4,87	208,69	22,39	4,63	0,81	29,54	1,08	126,80	15,78	4,62	0,31
3	3	1	19,51	11,28	173,39	115,98	26,01	16,85	28,46	4,70	167,98	108,65	26,59	10,25	28,65	0,32	118,87	22,02	16,19	2,08
3	3	3	19,69	7,70	199,76	123,95	66,81	37,97	25,94	1,74	244,24	65,18	102,36	20,61	24,68	5,81	91,09	60,12	31,64	18,14

Prom.: Promedio, D.E. desviación estándar

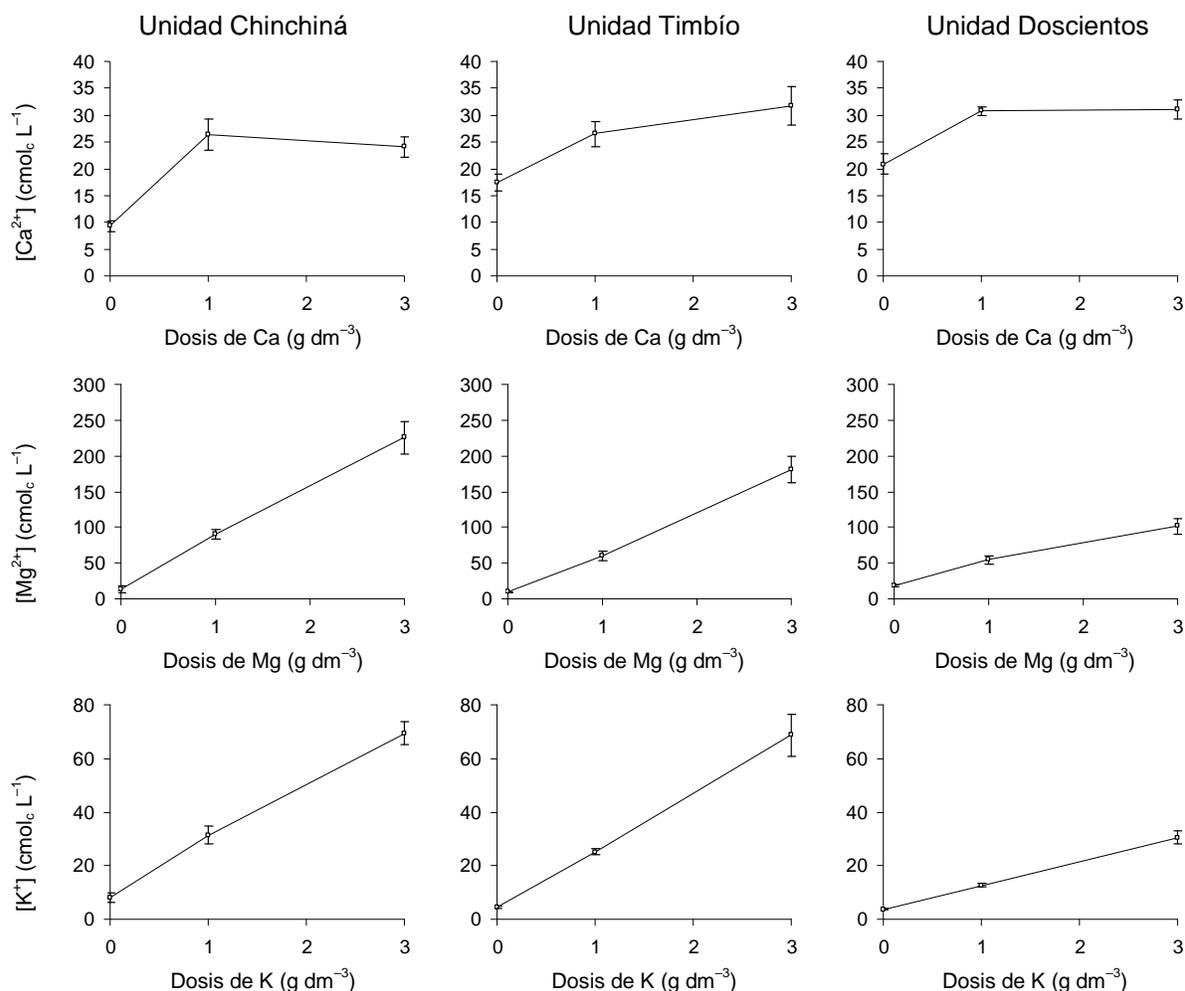


Figura 3–29. Concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la solución del suelo –denotadas entre corchetes– en respuesta a las dosis aplicadas. Las barras indican el error estándar.

Con respecto a los aniones, se encontró el siguiente orden: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^- > \text{Cl}^-$ y HPO_4^{2-} , siendo mayores los promedios en la unidad Chinchiná y Timbío. La predominancia de los sulfatos se debe a las fuentes aplicadas en los tratamientos, y la presencia de los nitratos por la oxidación del amonio proveniente del DAP, aplicado dos meses después de la siembra de las plántulas y probablemente por los aportes provenientes de la materia orgánica.

La Figura 3–31 ilustra la relación entre la suma de los aniones y cationes en la solución del suelo, y sugiere una proporcionalidad estrecha entre estos cercana a la unidad; este balance de masas confirma el equilibrio en la solución y señala que el procedimiento analítico se llevó a cabo de manera correcta (Sparks, 2003). Las desviaciones observadas pueden relacionarse con los elementos que no se determinaron, principalmente el aluminio.

Una menor concentración de cationes y aniones en la solución del suelo de la unidad Doscientos, sumado a sus contenidos más bajos de las bases intercambiables –en especial Mg^{2+} y K^{+} – corrobora

la hipótesis que sostiene la ocurrencia de mayores pérdidas por lixiviación en respuesta a una menor capacidad para retener el agua en términos de mesoporos.

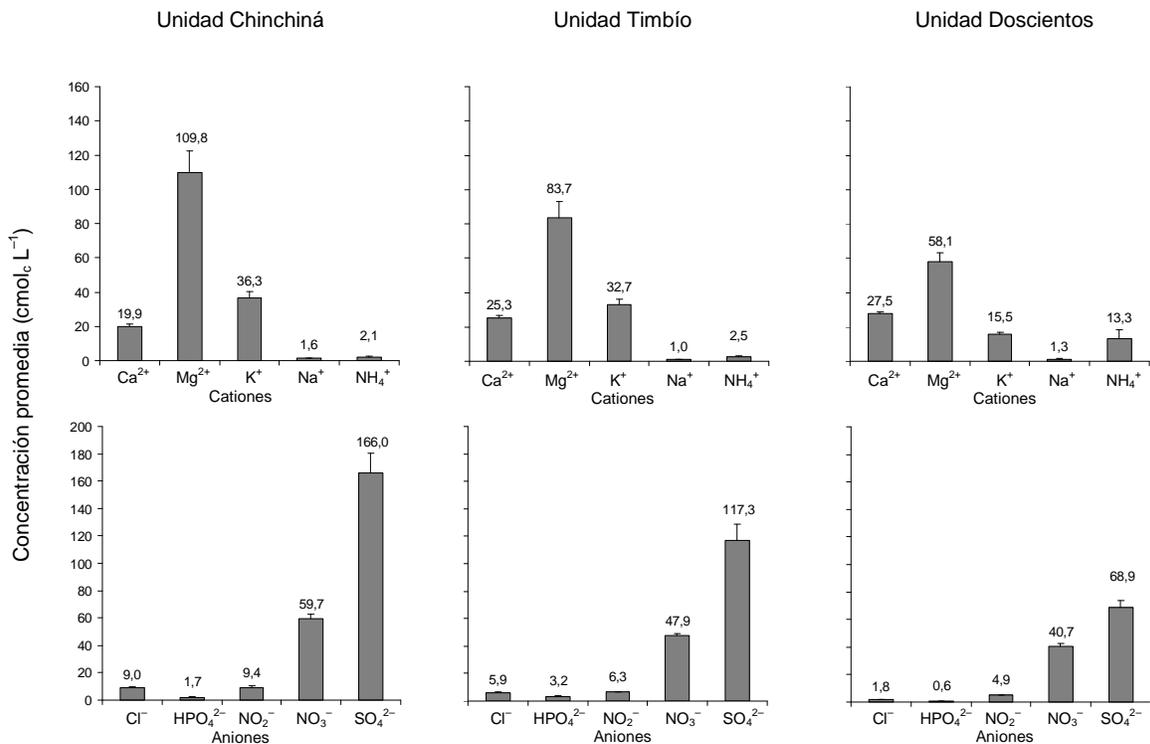


Figura 3-30. Valores promedio de las concentraciones de cationes y aniones en la solución del suelo. (n=27).

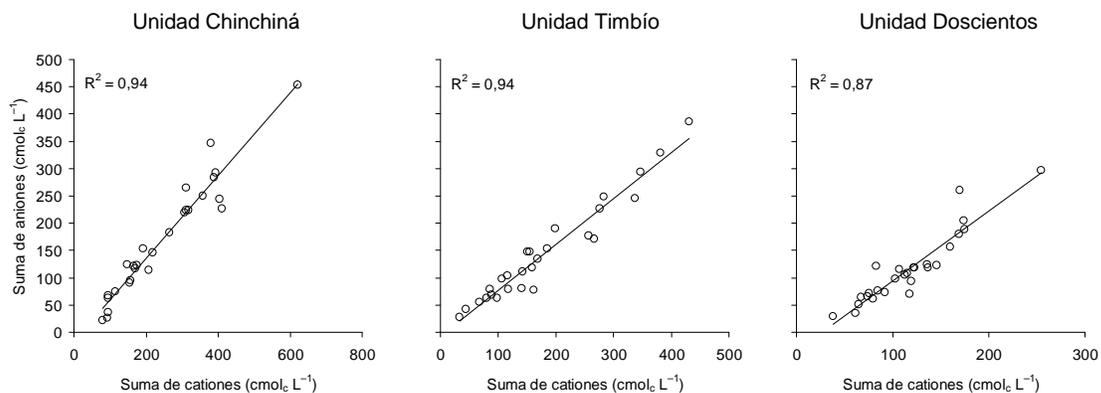


Figura 3-31. Relación entre la suma de cationes y aniones en la solución del suelo. (n=27).

Las concentraciones de los cationes y aniones fueron utilizadas en el programa ESPECIES (Barak, 1990) para calcular las actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , con el propósito de generar un mejor indicador de la disponibilidad de estos elementos para las plantas de café en la solución del suelo.

Se encontró una estrecha relación de tipo lineal entre estas dos variables, presentando un mejor ajuste para el K^+ , seguido por el Mg^{2+} y en menor grado el Ca^{2+} (Figura 3–32). Las mayores actividades correspondieron a K^+ ; además, la pendiente del modelo para este elemento fue la más alta (0,66), lo cual sugiere que al incrementar la concentración de K^+ en una unidad ($cmol_c L^{-1}$), su actividad aumenta en 0,66 $cmol_c L^{-1}$. Al hacer el mismo ejercicio para el Ca^{2+} , cuya β de la ecuación es igual a 0,27, se deduce que sólo el 27% de este nutriente se encuentra libre en la solución del suelo y el resto está formando complejos con los diversos aniones presentes, en su mayoría sulfatos y nitratos. La baja pendiente de la ecuación para el Mg^{2+} ($\beta=0,13$) indica que la proporción de sus iones libres en la solución –es decir, su actividad– es aún menor.

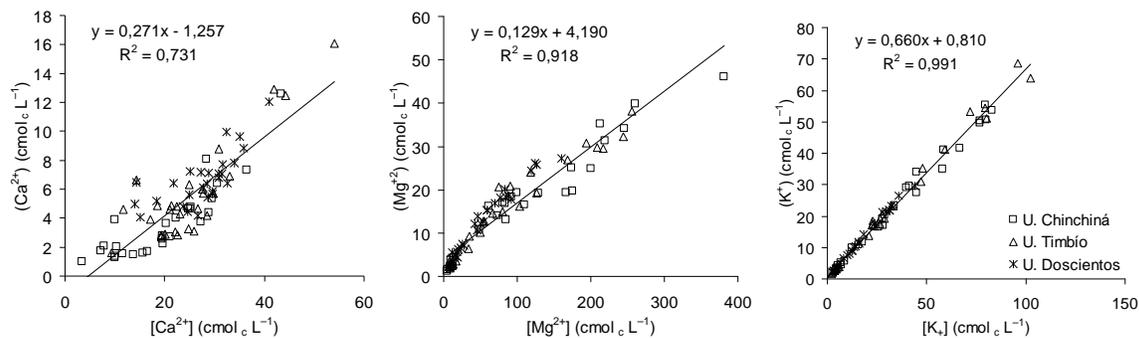


Figura 3–32. Relación entre la concentración, [], y la actividad, (), de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo. (n=81).

Este comportamiento puede relacionarse tanto con una mayor afinidad de Ca^{2+} y Mg^{2+} para formar especies con los aniones presentes en la solución (Lindsay, 2001), como la relación entre el radio y la carga del ión, la cual conlleva a que los elementos divalentes tengan menor actividad que los monovalentes (http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Equilibrios_quimicos.pdf). Adicionalmente, se espera que en soluciones salinas, donde hay una mayor fuerza iónica, la actividad del ión menos cargado sea más alta (Bohn et al., 2001; Essington, 2004).

El hecho que las actividades de los iones en la solución sean muy inferiores se relaciona con una elevada concentración en el medio; condición en la cual se propicia la formación de compuestos a partir de cationes y aniones presentes, antes que favorecer su permanencia como ión libre en la solución. Caso contrario ocurre cuando la concentración del ión en la solución es muy baja (cerca a cero); situación en la cual la actividad tiende a tomar valores muy similares o ligeramente inferiores a la concentración (Mc Bride, 1994; Sposito, 2008).

En la Figura 3–33 se presentan los cambios ocurridos en la actividad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ de la solución del suelo en función de los tratamientos. La aplicación de las dosis crecientes de K se tradujo en aumentos de su actividad, con incrementos más altos –casi el doble– en las unidades Chinchiná y Timbío frente a la Doscientos; un comportamiento similar se registró para el Mg^{2+} , pero de menor magnitud; en cuanto al Ca^{2+} , los incrementos obtenidos fueron muy bajos, si se comparan con los otros dos elementos, y con menor significancia (valores más bajos de R^2). El cuadro descrito es un reflejo de lo discutido hasta ahora y confirma nuevamente que la disponibilidad de los nutrientes objeto de estudio se ve afectada por factores como la cantidad equivalente aplicada, la solubilidad de la fuente aplicada, la naturaleza del ión en términos de su

carga y radio, las propiedades físicas del suelo relacionadas con la retención y el drenaje del agua, y la selectividad, entre otros.

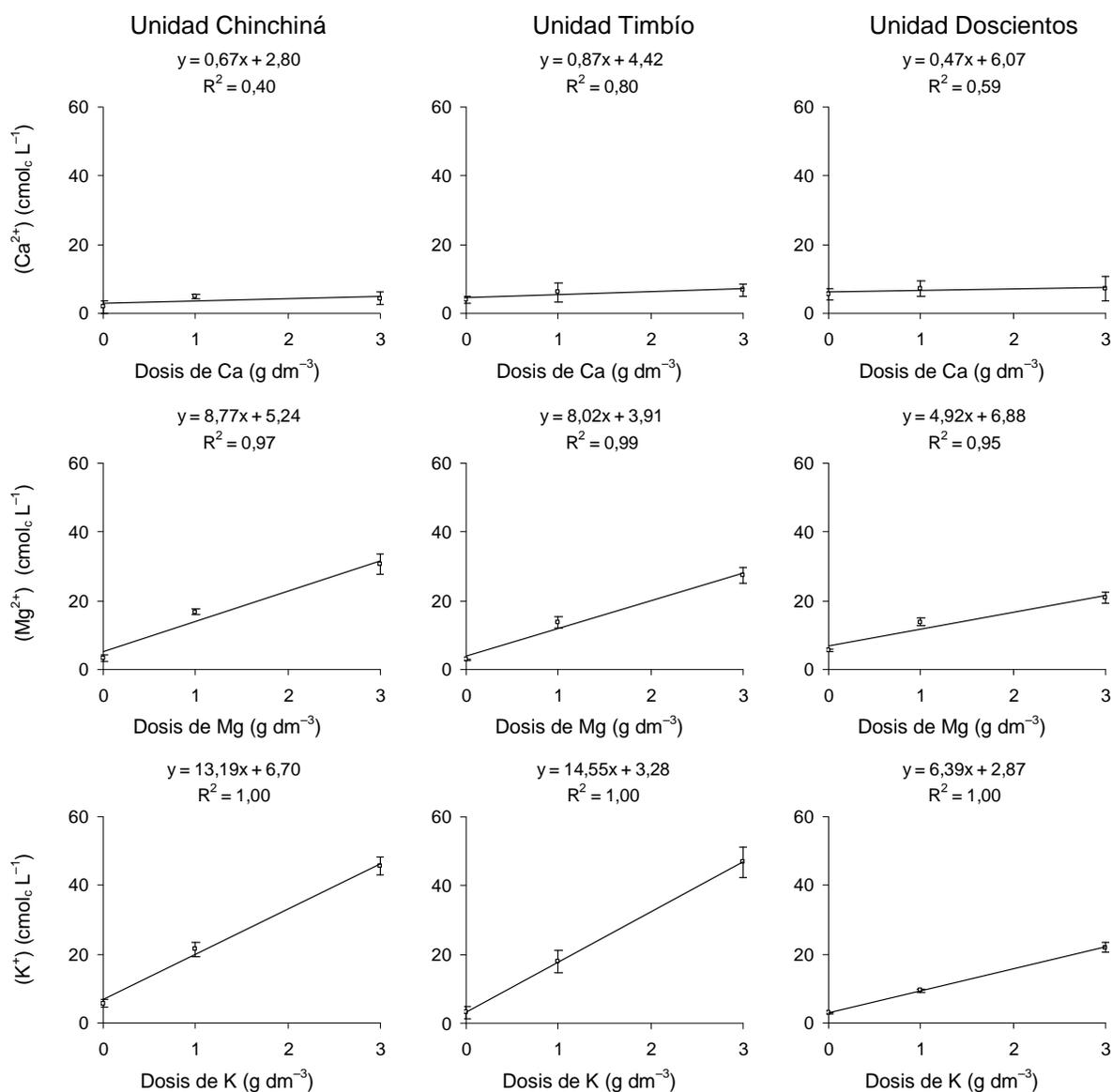


Figura 3–33. Actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la solución del suelo –denotadas entre paréntesis– en función de las dosis aplicadas. El ajuste corresponde a los valores promedio. Las barras indican el error estándar.

Cuando se lleva a cabo una fertilización con Ca, Mg y/o K se espera en últimas incrementar el contenido de estas bases en la fase lábil del suelo, es decir en el complejo de cambio y en la solución; premisas que ya fueron discutidas. Como una acción derivada de lo anterior, se espera que también aumente la disponibilidad real de los nutrientes suministrados, determinado mediante su actividad. En la Figura 3–34 se observa la relación entre la actividad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} de la solución del suelo y su contenido en la fase intercambiable. El Mg^{2+} y el K^{+} exhibieron una relación

relativamente estrecha entre estas dos fases, en tanto que para el Ca^{2+} no fue así. Aunque ya se discutió la hipótesis de una acumulación de Ca^{2+} no intercambiable en la matriz del suelo, la baja actividad en la solución del suelo y su relación pobre con el contenido "intercambiable" la confirman. Este comportamiento se puede relacionar con el efecto conjugado de la poca solubilidad de la fuente utilizada, las imprecisiones del método analítico y la formación de complejos en la solución. En cuanto a este último aspecto, se encontró una relación inversa entre la actividad de Ca^{2+} y la suma de Mg^{2+} y K^+ intercambiables para los tres suelos (Figura 3–35), posiblemente como consecuencia de la formación y posterior precipitación de sulfatos de Ca, en respuesta a una alta saturación de los iones SO_4^{2-} en el medio, provenientes de los fertilizantes magnésicos y potásicos suministrados (Figura 3–36). El hecho que la suma de Mg^{2+} y K^+ en el suelo excedía a la capacidad de intercambio, y dada la alta actividad de estos iones en la solución del suelo (Figura 3–33), evidencian su participación en las reacciones que tenían lugar allí.

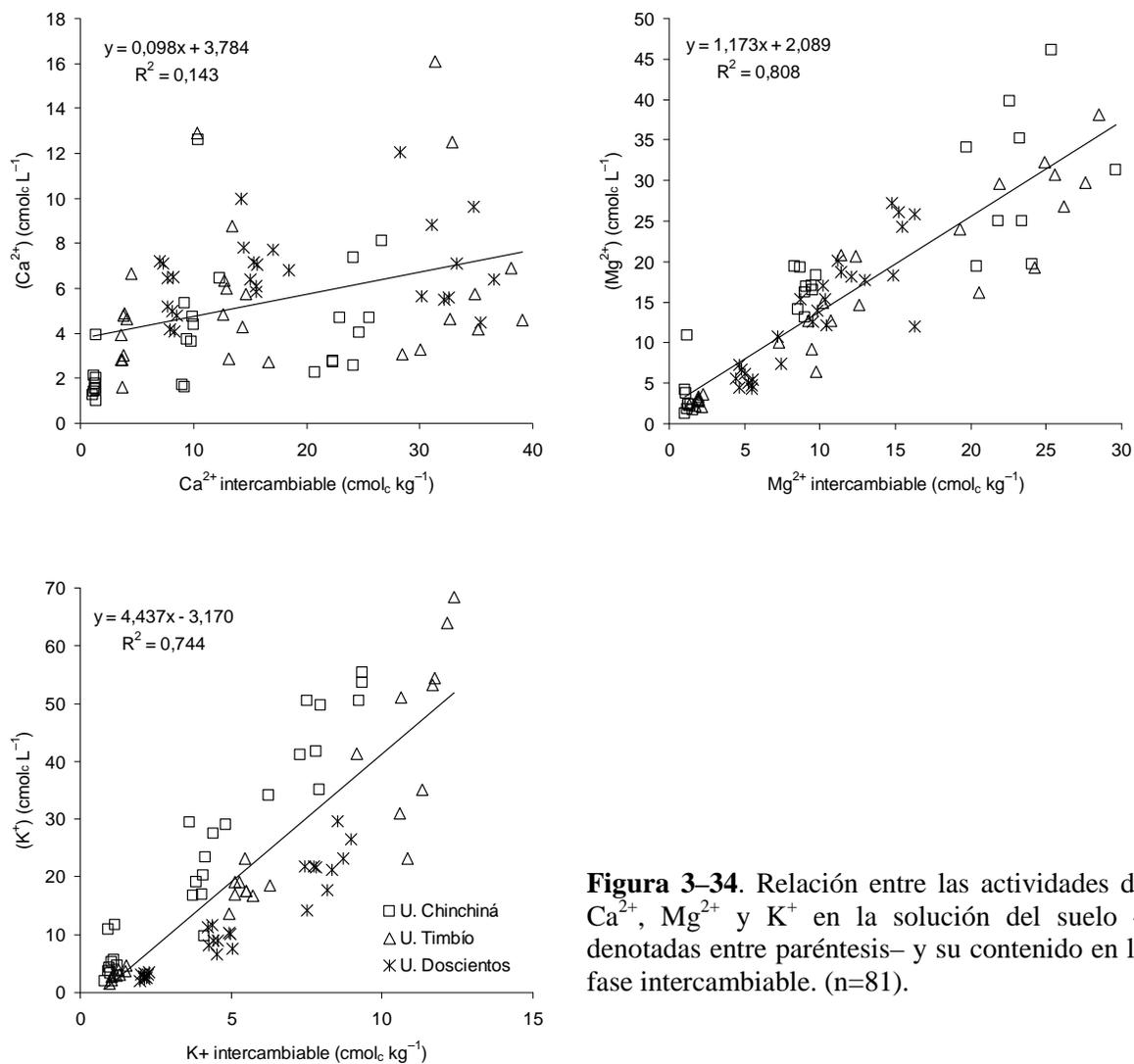


Figura 3–34. Relación entre las actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo – denotadas entre paréntesis– y su contenido en la fase intercambiable. (n=81).

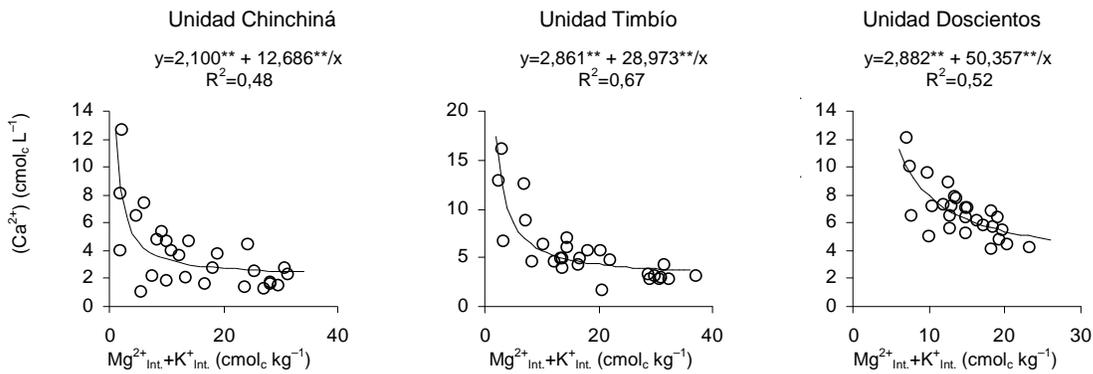


Figura 3–35. Actividad de Ca^{2+} en respuesta a la suma de Mg^{2+} y K^+ intercambiables.

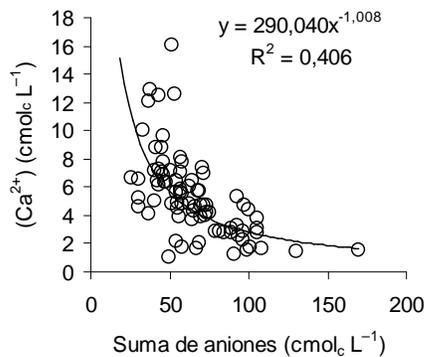


Figura 3–36. Actividad de calcio en función de la concentración total de aniones en la solución del suelo. (n=81).

La relación entre el factor Cantidad (Q) y el factor Intensidad (I) es una medida de la capacidad tampón o amortiguador del suelo para la restitución del elemento (factor Capacidad, C); por lo tanto, las pendientes de las ecuaciones descritas en la Figura 3–32 describen el comportamiento de dicho poder e indican la cantidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ que puede pasar desde la fase intercambiable a la solución del suelo, en respuesta a los cambios de concentración o actividad de los cationes en la solución. De acuerdo con la relación lineal de I y Q, el comportamiento de la respuesta se clasifica como una curva tipo c (Sparks, 2003).

Para el caso de Ca^{2+} , el bajo coeficiente de regresión de la relación Q/I ($R^2=0,14$), señala que estas dos variables no explican la capacidad de la restitución de los suelos, en tanto que para Mg^{2+} y K^+ sí.

En promedio, la unidad Chinchiná presentó un menor valor de Capacidad –C– para Mg^{2+} y K^+ ($1,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}/\text{cmol}_c \text{ L}^{-1}$ y $0,21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}/\text{cmol}_c \text{ L}^{-1}$, respectivamente) con respecto a Doscientos ($1,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}/\text{cmol}_c \text{ L}^{-1}$ y $0,21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}/\text{cmol}_c \text{ L}^{-1}$, respectivamente) y Timbío ($1,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}/\text{cmol}_c \text{ L}^{-1}$ y $0,33 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}/\text{cmol}_c \text{ L}^{-1}$, respectivamente).

La competencia entre los cationes en los sitios de intercambio debe necesariamente afectar su disponibilidad para las plantas, lo que equivale en últimas a su actividad en la solución del suelo. De acuerdo con la Figura 3–37, la cual ilustra las relaciones entre las actividades de Ca^{2+} y Mg^{2+} , Ca^{2+} y K^+ , y Mg^{2+} y K^+ , no existió una tendencia clara que sugiera el efecto de uno de ellos sobre el otro.

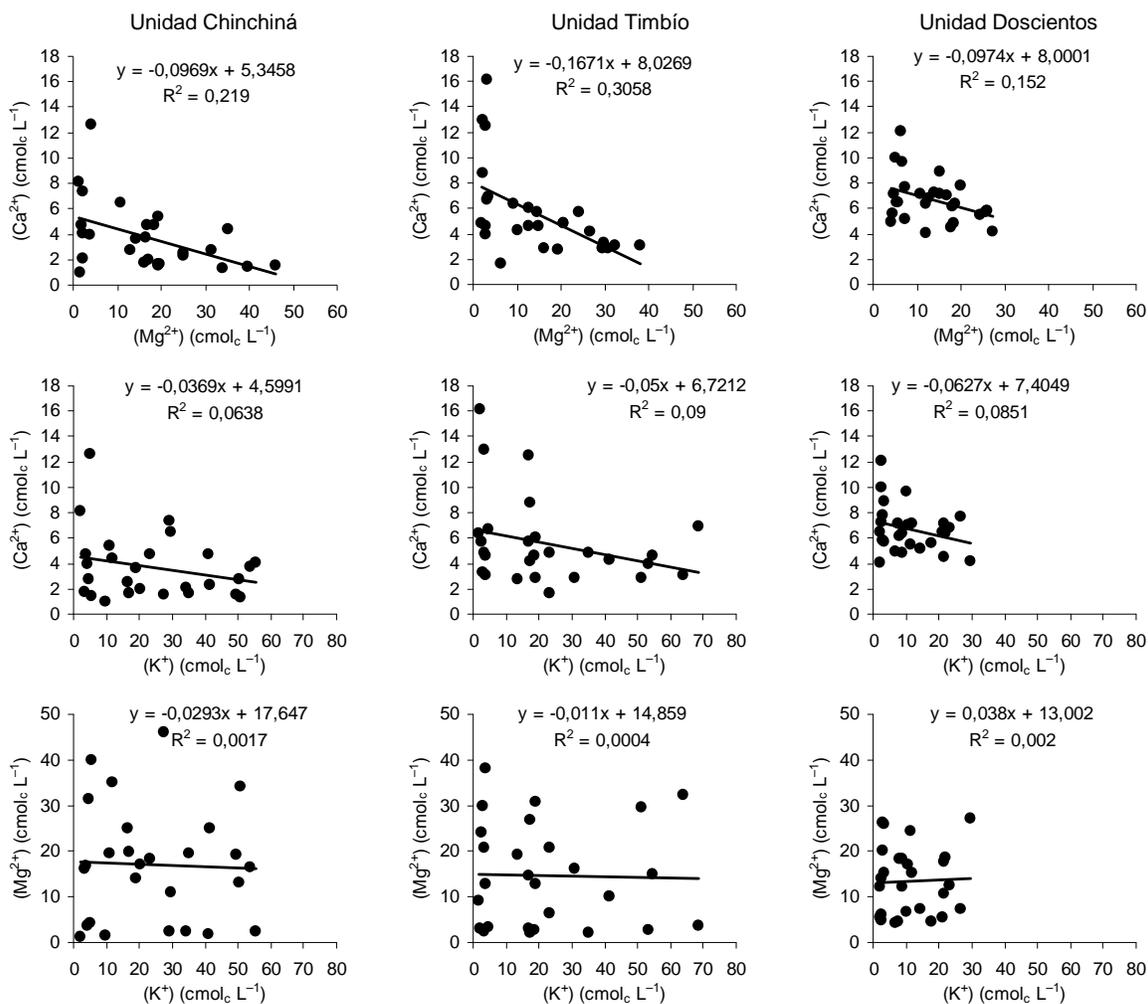


Figura 3–37. Relación entre las actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ . (n=27).

Como ya se discutió, la conductividad eléctrica del suelo se incrementó en respuesta a los tratamientos, especialmente con el suministro de los sulfatos de magnesio y potasio (Figura 3–21); valoración que se hizo para una relación de suelo y agua 1:1 (v/v). Los valores obtenidos de esta propiedad en la solución del suelo fueron tres veces mayores (Figura 3–38), por lo cual se hace aún más evidente la condición salina que se generó en especial para las unidades Chinchiná y Timbío.

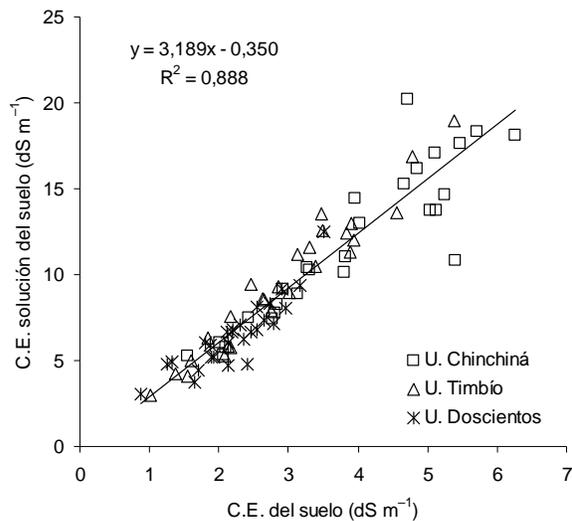


Figura 3–38. Relación entre la conductividad eléctrica del suelo y la registrada en la solución del suelo. (n=81).

3.2.3 Crecimiento de café en la etapa de almácigo en respuesta al suministro de Ca, Mg y K

En general, la mayor proporción de la biomasa de las plantas correspondió a las hojas (más del 50%), seguido por raíces y tallos, con algunas pequeñas diferencias entre los suelos objeto de estudio (Figura 3–39). El promedio alcanzado para el testigo en la unidad Chinchiná (1,68 g/planta) fue cerca de 2,5 veces menor que las unidades Timbío (4,21 g/planta) y Doscientos (4,6 g/planta). Estas diferencias pueden atribuirse a las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos, en interacción con las prácticas de manejo que se llevaron a cabo durante el experimento, principalmente el riego y la aplicación de DAP como fuente de fósforo y nitrógeno.

Las variaciones en referencia son comunes en la fase de almácigo de café; por ejemplo, en una investigación realizada por Salamanca y Sadeghian (2008) en ocho suelos del país se encontraron promedios de masa seca desde 1 g/planta en suelos de la unidad Pajúil (Santander), hasta 4,5 g/planta en las unidades Suroeste (Antioquia) y San Simón (Tolima); en este caso los autores señalan al pH y el K^+ como las propiedades edáficas responsables. En cuanto al K^+ , sus contenidos en las tres unidades del suelo eran muy altos (entre 0,96 y 2,12 $cmol_c\ kg^{-1}$) (Tablas 3–16, 3–17 y 3–18), por lo tanto no existían deficiencias aparentes; en contraste, sí se presentaban problemas de acidez (pH y aluminio intercambiable); siendo mayor la magnitud para la unidad Chinchiná, seguido por Timbío y Doscientos; de allí el efecto sobre el peso de las plantas (Figura 3–40). Díaz (2006) señala a la acidez como un factor determinante del crecimiento del café en el almácigo, y para corregirla recomienda llevar a cabo aplicaciones de cal o de abonos orgánicos en suelos con pH's menores a 5,0. Un aspecto importante que se deriva de lo anterior, se relaciona con la disponibilidad de Ca^{2+} y Mg^{2+} , dado que en la unidad Doscientos se registraron los valores más elevados de estos nutrientes, mientras que en la unidad Chinchiná los más bajos.

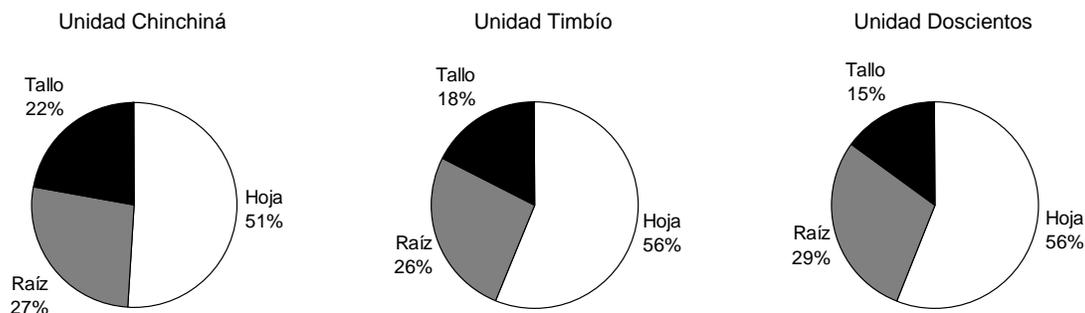


Figura 3-39. Proporción relativa del peso de hojas, tallos y raíces en las tres unidades de suelo. (n=81, obtenidos a partir de 27 tratamientos en cada unidad de suelo).

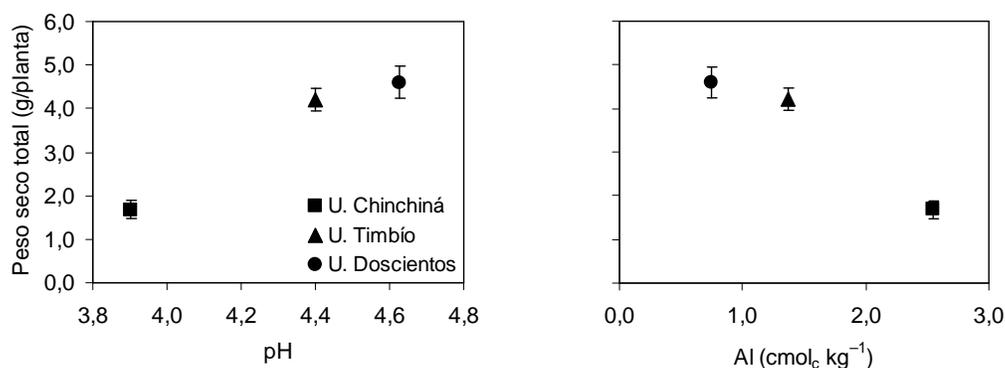


Figura 3-40. Peso seco total de las plantas para el tratamiento testigo en función del pH y aluminio intercambiable. (n=10 por tratamiento y unidad de suelo).

En las Tablas 3-21, 3-22 y 3-23 se incluyen los promedios y los errores estándar del peso seco total y peso seco de raíces, tallos y hojas, en respuesta a los tratamientos en las unidades Chinchiná, Timbío y Doscientos, respectivamente. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada unidad a la luz de los análisis de varianza.

3.2.3.1 Unidad Chinchiná

De acuerdo con el análisis de varianza, consignado en el Anexo C, se presentó efecto de la aplicación de los tres nutrientes e interacción entre Mg y K sobre la variable de respuesta. Con el suministro de Ca²⁺ se produjo una disminución significativa en el peso total de las plantas, sin que existieran diferencias entre la primera y segunda dosis (Figura 3-41). El Mg y el K también afectaron negativamente el crecimiento de las plantas; sin embargo, la interacción detectada sugiere que la actividad conjunta de estos dos elementos difiere a su efecto individual, pues como se observa en la Figura 3-42, cuando no se suministró Mg, la aplicación de K disminuyó significativamente el peso de las plantas conforme a las dosis adicionadas (prueba de contraste al 5%), en tanto que al agregar 1 ó 3 g dm⁻³ de Mg, se lograron reducir los promedios hasta los valores

más bajos, independiente de los aportes de K. Los análisis de varianza para el peso seco de raíces y tallos (Anexo C), también indican efectos de Mg, K e interacción de Mg x K; en cuanto a las hojas, sólo se encontró efecto del Ca. Para estos órganos la respuesta fue similar al observado para el peso seco total (Figuras 3-43 y 3-44).

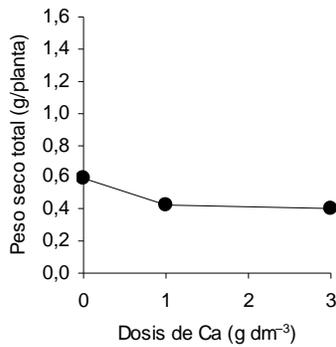


Figura 3-41. Peso total de las plantas en la unidad Chinchiná en respuesta a las dosis de calcio.

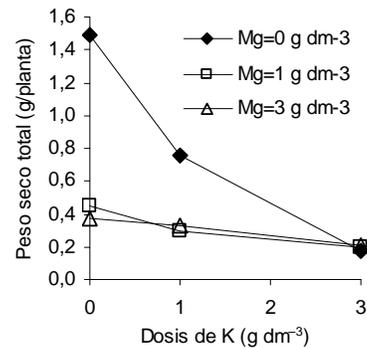


Figura 3-42. Peso total de las plantas en la unidad Chinchiná en respuesta a magnesio en combinación con potasio.

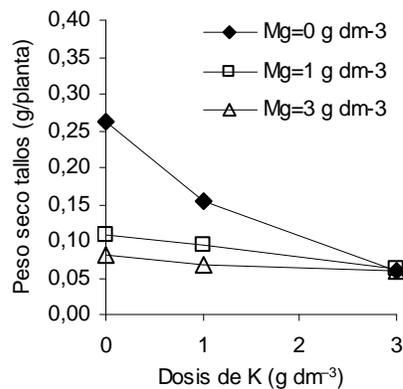
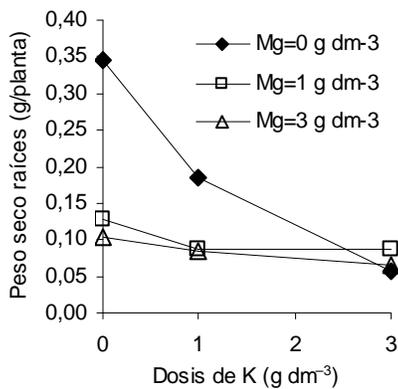


Figura 3-43. Peso seco de raíces y tallos de las plantas en la unidad Chinchiná en respuesta a magnesio en combinación con potasio.

Tabla 3–21. Promedios del peso seco total de las plantas y peso seco de raíces, tallos y hojas, en respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio en la unidad Chinchiná.

Dosis de K (g dm ⁻³)	Dosis de Ca (g dm ⁻³)																	
	0					1					3							
	Dosis de Mg (g dm ⁻³)						Dosis de Mg (g dm ⁻³)						Dosis de Mg (g dm ⁻³)					
	— 0 —		— 1 —		— 3 —		— 0 —		— 1 —		— 3 —		— 0 —		— 1 —		— 3 —	
Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	
(g/planta)																		
Peso seco total																		
0	1,676	0,202	0,776	0,194	0,414	0,134	1,325	0,262	0,218	0,022	0,396	0,040	1,457	0,466	0,342	0,038	0,298	0,045
1	1,222	0,264	0,302	0,075	0,273	0,122	0,750	0,177	0,287	0,067	0,312	0,055	0,310	0,039	0,285	0,030	0,385	0,046
3	0,218	0,091	0,209	0,035	0,199	0,035	0,142	0,016	0,196	0,067	0,204	0,030	0,161	0,016	0,191	0,010	0,228	0,063
Peso seco raíces																		
0	0,375	0,048	0,206	0,049	0,116	0,011	0,315	0,055	0,080	0,008	0,107	0,010	0,347	0,097	0,101	0,011	0,092	0,012
1	0,257	0,046	0,076	0,020	0,064	0,012	0,196	0,032	0,089	0,008	0,090	0,014	0,099	0,013	0,094	0,010	0,101	0,012
3	0,047	0,016	0,078	0,008	0,061	0,017	0,056	0,005	0,112	0,062	0,067	0,012	0,071	0,007	0,069	0,006	0,063	0,012
Peso seco tallos																		
0	0,264	0,040	0,138	0,022	0,081	0,008	0,226	0,043	0,081	0,009	0,089	0,009	0,297	0,086	0,105	0,008	0,070	0,009
1	0,228	0,048	0,102	0,035	0,063	0,011	0,145	0,026	0,088	0,004	0,072	0,011	0,091	0,008	0,095	0,005	0,071	0,008
3	0,055	0,015	0,066	0,003	0,050	0,011	0,065	0,009	0,054	0,009	0,060	0,006	0,060	0,004	0,068	0,005	0,064	0,010
Peso seco hojas																		
0	1,037	0,133	0,432	0,127	0,217	0,023	0,784	0,168	0,057	0,011	0,200	0,030	0,814	0,286	0,136	0,025	0,136	0,031
1	0,737	0,172	0,124	0,045	0,146	0,038	0,409	0,123	0,110	0,065	0,150	0,034	0,120	0,023	0,096	0,019	0,212	0,029
3	0,115	0,061	0,065	0,026	0,087	0,024	0,020	0,005	0,030	0,005	0,076	0,019	0,030	0,010	0,054	0,009	0,101	0,042

Prom.: Promedio, E.E. Error estándar

Tabla 3–22. Promedios del peso seco total de las plantas y peso seco de raíces, tallos y hojas, en respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio en la unidad Timbío.

Dosis de K (g dm ⁻³)	Dosis de Ca (g dm ⁻³)																	
	0					1					3							
	Dosis de Mg (g dm ⁻³)					Dosis de Mg (g dm ⁻³)					Dosis de Mg (g dm ⁻³)							
	— 0 —		— 1 —		— 3 —		— 0 —		— 1 —		— 3 —		— 0 —		— 1 —		— 3 —	
Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	
(g/planta)																		
	Peso seco total																	
0	4,206	0,247	1,265	0,234	0,471	0,318	2,538	0,350	1,002	0,223	0,430	0,057	2,161	0,288	0,513	0,109	0,363	0,037
1	4,773	0,469	0,988	0,447	0,617	0,414	1,830	0,300	0,361	0,035	0,342	0,034	2,024	0,298	0,429	0,092	0,375	0,040
3	1,189	0,526	0,282	0,046	0,275	0,188	0,279	0,052	0,219	0,029	0,202	0,012	0,228	0,078	0,216	0,016	0,227	0,024
	Peso seco raíces																	
0	1,015	0,061	0,284	0,049	0,130	0,008	0,626	0,102	0,272	0,052	0,131	0,009	0,517	0,071	0,164	0,035	0,135	0,011
1	1,188	0,131	0,238	0,088	0,165	0,054	0,446	0,090	0,115	0,006	0,124	0,009	0,490	0,069	0,145	0,020	0,129	0,012
3	0,286	0,122	0,091	0,009	0,088	0,009	0,098	0,013	0,086	0,008	0,086	0,008	0,084	0,015	0,096	0,007	0,078	0,009
	Peso seco tallos																	
0	0,643	0,045	0,200	0,031	0,109	0,006	0,386	0,049	0,174	0,030	0,096	0,007	0,330	0,040	0,103	0,010	0,085	0,007
1	0,793	0,102	0,186	0,066	0,119	0,028	0,255	0,045	0,088	0,009	0,085	0,007	0,314	0,049	0,091	0,011	0,091	0,007
3	0,180	0,073	0,072	0,006	0,068	0,004	0,073	0,006	0,067	0,005	0,070	0,003	0,068	0,010	0,072	0,004	0,072	0,006
	Peso seco hojas																	
0	2,548	0,152	0,781	0,157	0,232	0,032	1,526	0,203	0,556	0,146	0,203	0,045	1,314	0,183	0,246	0,068	0,143	0,023
1	2,792	0,243	0,564	0,294	0,333	0,174	1,129	0,186	0,158	0,026	0,134	0,024	1,220	0,188	0,193	0,063	0,155	0,025
3	0,723	0,332	0,119	0,037	0,119	0,026	0,108	0,036	0,066	0,020	0,046	0,008	0,077	0,053	0,048	0,011	0,077	0,015

Prom.: Promedio, E.E. Error estándar

Tabla 3–23. Promedios del peso seco total de las plantas y peso seco de raíces, tallos y hojas, en respuesta al suministro de calcio, magnesio y potasio en la unidad Doscientos.

Dosis de K (g dm ⁻³)	Dosis de Ca (g dm ⁻³)																	
	0					1					3							
	Dosis de Mg (g dm ⁻³)						Dosis de Mg (g dm ⁻³)						Dosis de Mg (g dm ⁻³)					
	— 0 —		— 1 —		— 3 —		— 0 —		— 1 —		— 3 —		— 0 —		— 1 —		— 3 —	
Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	
(g/planta)																		
Peso seco total																		
0	4,601	0,361	2,503	0,281	1,009	0,313	2,769	0,370	1,341	0,196	0,733	0,101	3,587	0,284	1,412	0,176	0,773	0,079
1	3,621	0,450	1,312	0,265	1,018	0,280	2,743	0,420	0,970	0,154	0,719	0,115	2,531	0,356	0,910	0,145	0,641	0,097
3	2,513	0,350	0,658	0,067	0,698	0,200	1,146	0,198	0,615	0,092	0,705	0,094	1,259	0,300	0,801	0,138	0,768	0,087
Peso seco raíces																		
0	1,374	0,131	0,754	0,089	0,273	0,035	0,868	0,133	0,368	0,058	0,214	0,034	1,086	0,109	0,370	0,052	0,204	0,026
1	1,043	0,159	0,404	0,100	0,272	0,051	0,827	0,142	0,273	0,039	0,212	0,031	0,763	0,113	0,252	0,049	0,154	0,022
3	0,728	0,124	0,183	0,019	0,169	0,025	0,335	0,056	0,189	0,028	0,218	0,033	0,358	0,080	0,207	0,034	0,179	0,026
Peso seco tallos																		
0	0,804	0,066	0,335	0,046	0,144	0,017	0,390	0,052	0,214	0,025	0,127	0,011	0,513	0,048	0,204	0,019	0,115	0,010
1	0,614	0,084	0,184	0,029	0,154	0,021	0,421	0,069	0,144	0,018	0,109	0,017	0,350	0,056	0,124	0,012	0,100	0,007
3	0,350	0,053	0,113	0,011	0,108	0,007	0,162	0,016	0,114	0,009	0,112	0,012	0,187	0,046	0,119	0,015	0,098	0,007
Peso seco hojas																		
0	2,423	0,186	1,414	0,150	0,592	0,074	1,511	0,190	0,759	0,118	0,392	0,060	1,988	0,133	0,838	0,109	0,454	0,046
1	1,964	0,217	0,724	0,139	0,592	0,110	1,495	0,214	0,553	0,100	0,398	0,071	1,418	0,197	0,534	0,087	0,387	0,071
3	1,435	0,181	0,362	0,045	0,421	0,064	0,649	0,127	0,312	0,061	0,375	0,061	0,714	0,179	0,475	0,094	0,491	0,060

Prom.: Promedio, E.E. Error estándar

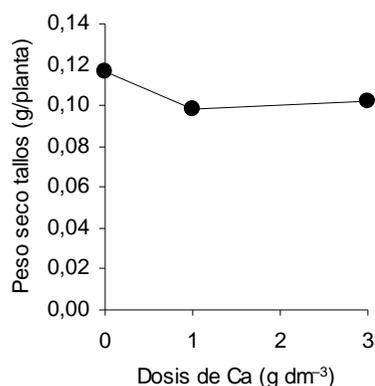


Figura 3–44. Peso seco de hojas en la unidad Chinchiná en respuesta a las dosis de calcio.

Las propiedades del suelo, como el medio en donde se desarrollan las raíces, determinan en últimas el crecimiento de las plantas; de allí, la concordancia que existe entre la biomasa de los diferentes órganos. Lo anterior se verifica en las correlaciones registradas entre el peso de las raíces y el de los tallos y hojas, y por lo tanto con respecto al peso total de las plantas (Figura 3–45).

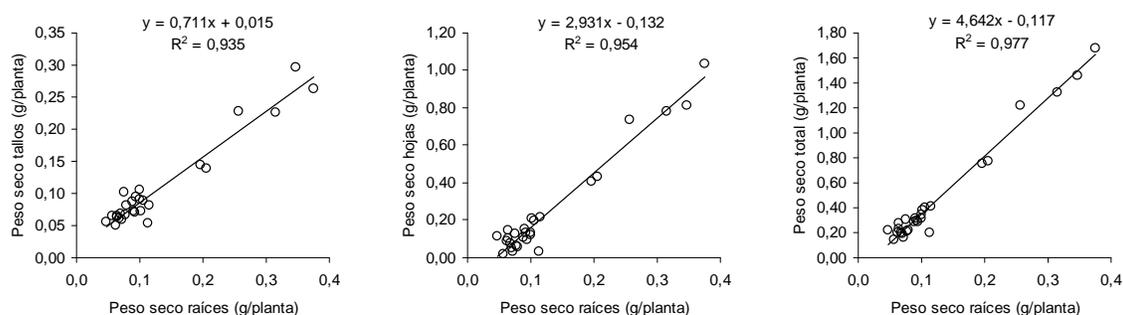


Figura 3–45. Relación entre el peso seco de las raíces y el de los tallos, las hojas y el peso total de las plantas en la unidad Chinchiná. (n=27).

Como ya se discutió, la aplicación de altas dosis de fertilizantes se vio reflejada en una elevada salinidad de los suelos; condición que ocasionó la muerte de algunas plantas pocos días después del transplante. En la unidad Chinchiná el número de éstas ascendió a cinco, las cuales en su mayoría correspondían a la dosis más elevada de Mg, dada su alta solubilidad e índice de salinidad. En la Figura 3–46 se pueden observar las sintomatologías observadas unos días después del transplante.

3.2.3.2 Unidad Timbío

En esta unidad de suelo hubo interacción de Ca x Mg, Ca x K y Mg x K para la variable de respuesta (Anexo C). El suministro de Mg en ausencia de Ca, o la aplicación de Ca sin el acompañamiento de Mg, resultó en la disminución del peso seco total de las plantas, con mayores consecuencias para el Mg, y sin que existieran diferencias entre la dosis baja y alta (Figura 3–47).

Al aplicar estos dos nutrientes en forma conjunta, los promedios alcanzados fueron los más bajos, pero estadísticamente iguales a los obtenidos con 1 y 3 g dm⁻³ de Mg sólo (prueba de contraste al 5%). Se puede notar que el comportamiento de la respuesta al Mg difirió en presencia de Ca que en su ausencia; de allí la interacción.



Figura 3-46. Síntomas de toxicidad por salinidad, causada por las dosis más altas de magnesio y potasio (3 g dm⁻³), en las unidades Chinchiná (izquierda) y Doscientos (derecha), cinco días después del transplante (enero 20 de 2009).

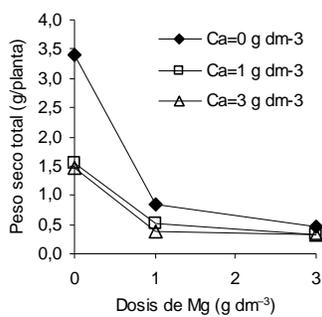


Figura 3-47. Peso total de las plantas en la unidad Timbío en respuesta a magnesio en combinación con calcio.

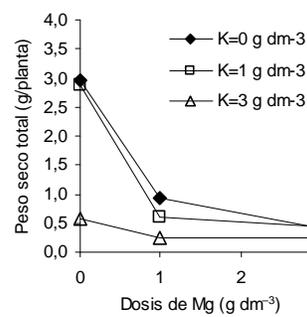


Figura 3-48. Peso total de las plantas en la unidad Timbío en respuesta a magnesio en combinación con potasio.

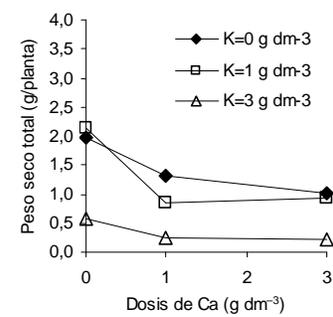


Figura 3-49. Peso total de las plantas en la unidad Timbío en respuesta a calcio en combinación con potasio.

En la Figura 3–48 se muestra el efecto de las distintas combinaciones de Mg y K sobre el peso seco total. Cuando no se proporcionó Mg, la dosis alta de K afectó negativamente el crecimiento de las plantas, no así la dosis baja; en tanto que el suministro de Mg en ausencia de K ocasionó la misma consecuencia con 1 ó 3 g dm⁻³. Todos los tratamientos en los que se adicionaron juntos estos dos nutrientes exhibieron los promedios más bajos y fueron estadísticamente similares a los valores alcanzados con las dosis de 3 g dm⁻³ de sólo Mg o de K; además, la prueba de contraste reveló que las plantas que no recibieron aportes de Ca ni de Mg, o aquellas que únicamente se fertilizaron con 1 g dm⁻³ de K, presentaron los mayores promedios. Los tratamientos a los que se hicieron aportes de 1 ó 3 g dm⁻³ de Mg en combinación con 3 g dm⁻³ K tuvieron un peso menor frente a los que recibieron 1 g dm⁻³ de Mg. En general se puede resumir que las tendencias registradas para 1 y 3 g dm⁻³ de K en asocio con las tres dosis de Mg fueron similares entre sí y diferentes al observado para 3 g dm⁻³ de K.

En la Figura 3–49 se ilustra el crecimiento en términos de masa seca alcanzado por las plantas de café en respuesta a la fertilización conjunta de Ca y K. En ella se conserva el comportamiento ya mencionado para el K, en el sentido que su efecto en ausencia de Ca sólo fue significativo cuando se aplicó la dosis alta; en cuanto al Ca, su aplicación también disminuyó el crecimiento de las plantas, sin que existieran diferencias entre la dosis baja y alta. La prueba de contraste afirma que los menores promedios fueron alcanzados con 3 g dm⁻³ de K, independiente de las cantidades de Ca; en tanto que con las dosis de 0 y 1 g dm⁻³ de K la biomasa se redujo significativamente con la primera dosis de Ca y se mantuvo con la siguiente. En esta unidad de suelo el número de las plantas muertas fue de 13, las cuales en su mayoría correspondían también a las dosis más altas de Mg.

Al igual que para el peso total, se presentaron todas las interacciones simples para la biomasa de tallos, raíces y hojas (Anexo C). Dado que se encontraron correlaciones muy altas entre el peso total de las plantas con respecto a los diferentes órganos (Figura 3–50), no es difícil concluir que la respuesta de éstos a los tratamientos conserva la misma tendencia.

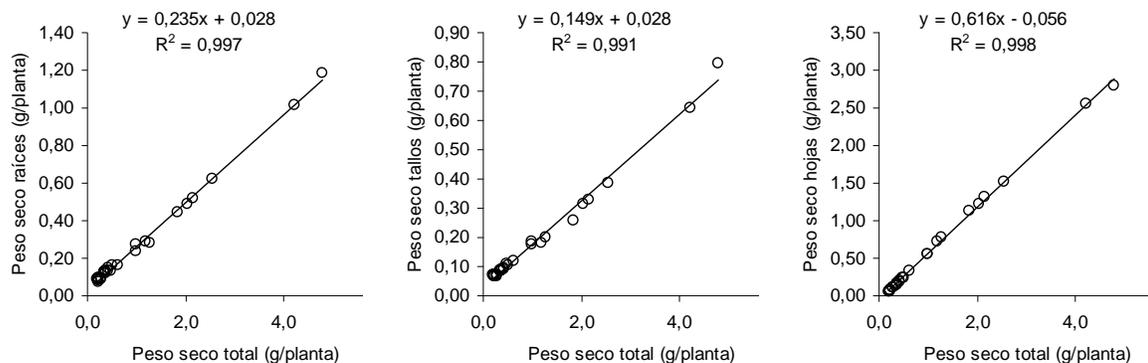


Figura 3–50. Relación entre el peso seco de las raíces y el de los tallos, las hojas y el peso total de las plantas en la unidad Timbío. (n=27).

3.2.3.3 Unidad Doscientos

De acuerdo con los análisis de varianza, en la unidad Doscientos hubo efecto de los tres nutrientes por separado e interacción de Ca x Mg y Mg x K, tanto para la variable de respuesta como para los pesos secos de raíces, tallos y hojas (Anexo C).

En la Figura 3-51 se puede ver la interacción de Ca y Mg para el peso seco total de las plantas; se nota en este caso la disimilitud en la respuesta al Mg cuando se aplicó junto con Ca (1 ó 3 g dm⁻³), que cuando se suministró sin este elemento. El promedio alcanzado por el testigo (sin Ca ni Mg) fue el más alto (prueba de contraste al 5%), seguido por 1 y 3 g dm⁻³ de Ca sin el acompañamiento de Mg; los demás tratamientos presentaron los promedios más bajos y fueron estadísticamente iguales, a excepción de 1 g dm⁻³ de Mg sin Ca, el cual fue mayor que 3 g dm⁻³ de Mg con 1 y 3 de Ca.

La respuesta al Mg varió con las dosis de K (Figura 3-52). Para el tratamiento sin Mg fueron diferentes los promedios obtenidos en cada dosis de K; un comportamiento similar se registró para 1 g dm⁻³ de Mg, pero no así en el caso de la dosis más alta de este elemento.

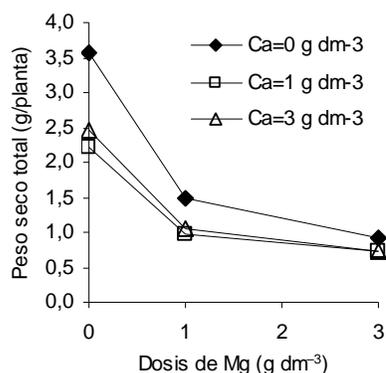


Figura 3-51. Peso total de las plantas en la unidad Doscientos en respuesta a magnesio en combinación con calcio.

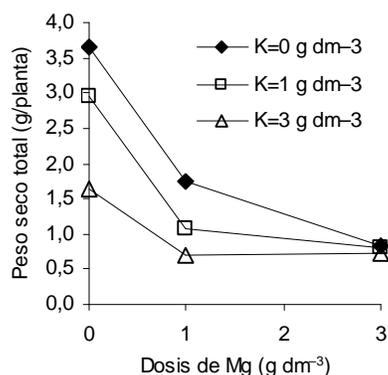


Figura 3-52. Peso total de las plantas en la unidad Doscientos en respuesta a magnesio en combinación con potasio.

En esta unidad de suelos la correlación entre el peso total de las plantas y el peso de raíces, tallos y hojas también fue muy alta (Figura 3-53), hecho que de manera indirecta demuestra un efecto similar de los tratamientos sobre estos órganos de la planta. En esta unidad, al igual que las otras dos, la aplicación de las dosis más altas de los fertilizantes, en especial los magnéticos, causó la muerte de algunas plantas (9).

El peso promedio de las plantas en los 27 tratamientos fue mayor en la unidad Doscientos, seguido por Timbío y Chinchiná (Figura 3-54). Puesto que esta tendencia es similar a la registrada para el testigo sin aportes de Ca, Mg ni K, se puede afirmar que las diferencias entre un suelo y otro no necesariamente reflejan el efecto diferencial de los tratamientos. En el caso del testigo, parte de las variaciones se relacionaron con la acidez del suelo, en tanto que para el resto de los tratamientos las diferencias podrían deberse tanto a la acidez como a la salinidad, expresadas en términos de pH y conductividad eléctrica (C.E.), respectivamente (Figura 3-55).

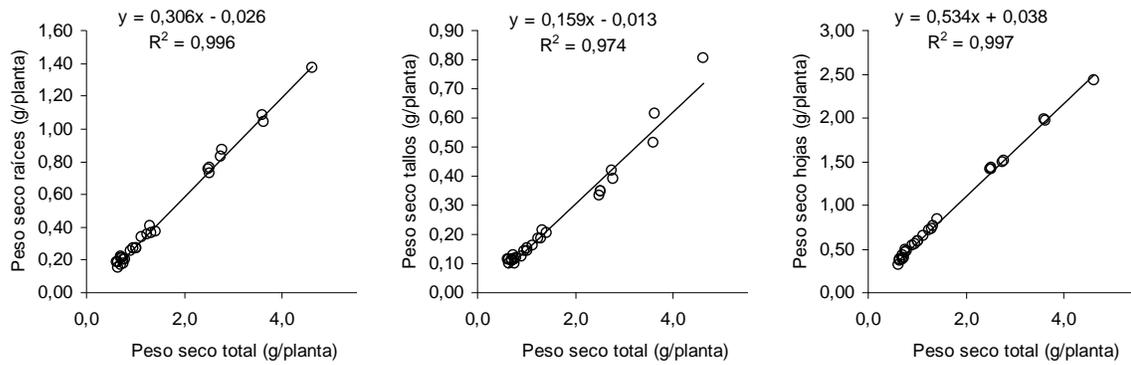


Figura 3–53. Relación entre el peso seco de las raíces y el de los tallos, las hojas y el peso total de las plantas en la unidad Doscientos. (n=27).

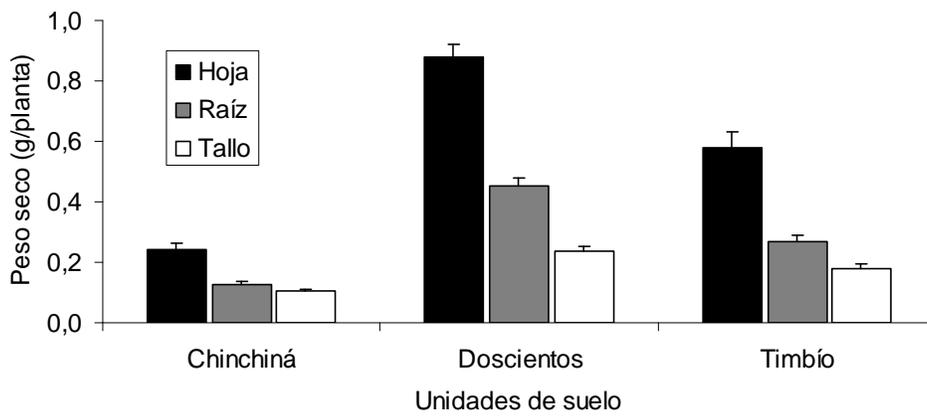


Figura 3–54. Peso seco promedio de las plantas por unidad de suelo. (n=270 por unidad de suelo). Las barras indican el error estándar.

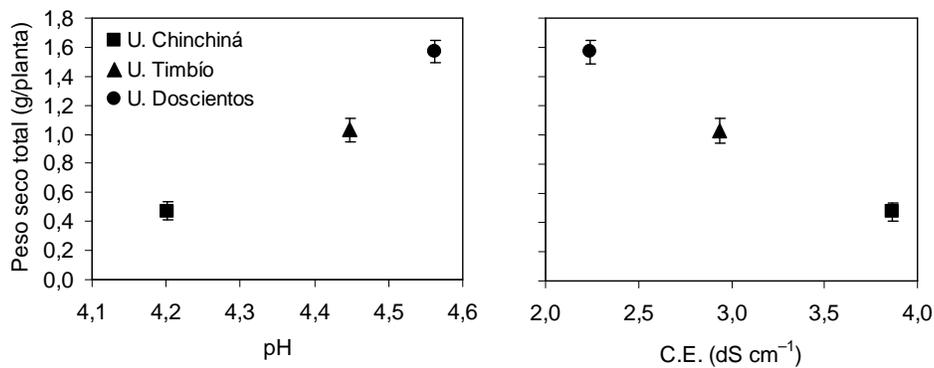


Figura 3–55. Promedio del peso seco total de las plantas en función del pH y conductividad eléctrica (n=3, promedio de 27 tratamientos y 10 repeticiones de cada unidad de suelo).

Conforme a los aumentos de Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable –en respuesta a su aplicación– se incrementó la concentración de sales en el suelo, elevando así la C.E. (Figura 3–56); condición que se reflejó en una disminución significativa del crecimiento de las plantas (Figura 3–57). Si se asume una reducción del 10% en la biomasa de las plantas –lo cual equivale al 90% de su peso seco total– se obtienen los siguientes niveles críticos de la C.E. para las unidades Chinchiná, Timbío y Doscientos: $1,58 \text{ dS m}^{-1}$, $1,14 \text{ dS m}^{-1}$ y $1,05 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente. Estos valores son parcialmente diferentes y reflejan las condiciones “naturales” del suelo, puesto que se aproximan mucho a los detectados en el tratamiento testigo. Con el fin de generar una sola ecuación que pudiera expresar el efecto de la C.E. sobre el crecimiento de las plantas en las tres unidades de suelo, los valores absolutos del peso seco total de las plantas fueron transformados en rendimientos relativos (Figura 3–58). De acuerdo con el modelo seleccionado, y asumiendo el 90% del rendimiento relativo, se encontró un nivel crítico promedio de $1,1 \text{ dS m}^{-1}$ para la C.E., el cual se aproxima más a los valores hallados para las unidades Timbío y Doscientos, que la unidad Chinchiná.

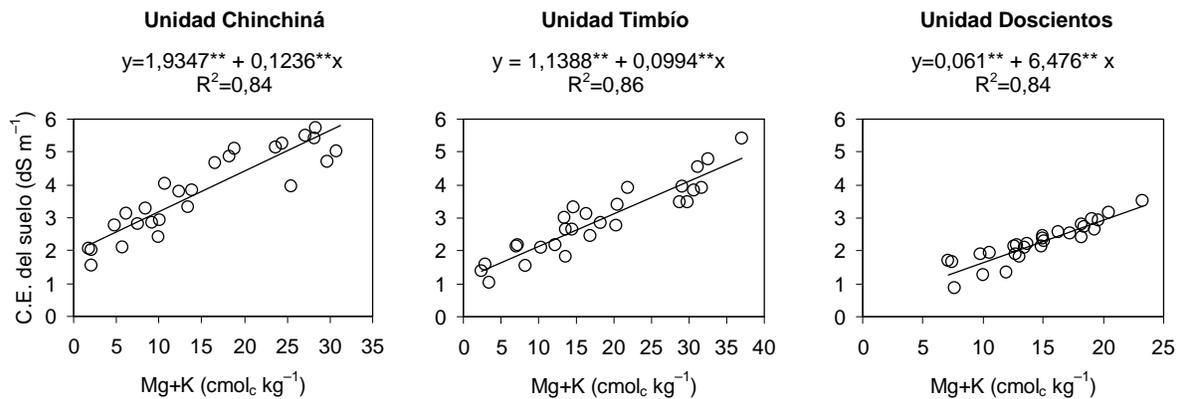


Figura 3–56. Conductividad eléctrica del suelo (C.E.) en respuesta a la suma de Mg^{2+} y K^+ intercambiable del suelo.

En Colombia rara vez se presentan problemas de salinidad en el cultivo de café, situación diferente a lo que ocurre en países como Brasil, donde se realizan prácticas de riego o fertirriego. Faria et al. (2009), Figueirêdo et al. (2006), Karasawa et al. (2003) y Nazário et al. (2010), hallaron que la salinidad puede afectar las diferentes variables biológicas de café –entre ellas área foliar, altura de la planta, acumulación de materia seca de la parte aérea y radical, potencial de agua en las hojas y actividad de nitrato reductasa– y en casos extremos causar la muerte de las plantas en las etapas iniciales de crecimiento (Faria et al., 2009; Figueirêdo et al., 2006). Faria et al. (2009), Figueirêdo et al. (2006) y Karasawa et al. (2003), reportan valores críticos de C.E. similares a los calculados en este estudio ($1,2$, $1,2$ y $0,9 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente) para el crecimiento inicial de café. A su vez, Faria et al. (2009) observaron que la salinidad extrema resultante de la fertirrigación con urea y KCl, causaba la muerte de las plantas. Lo expuesto difiere parcialmente de lo obtenido por Matiello (1999), citado por Figueirêdo et al. (2006), quien al aplicar agua salina a las plantas jóvenes de café

mediante el sistema de goteo, observó cierta resistencia a salinidad, desde que el agua no fuera excesivamente salina (hasta $2,0 \text{ dS m}^{-1}$).

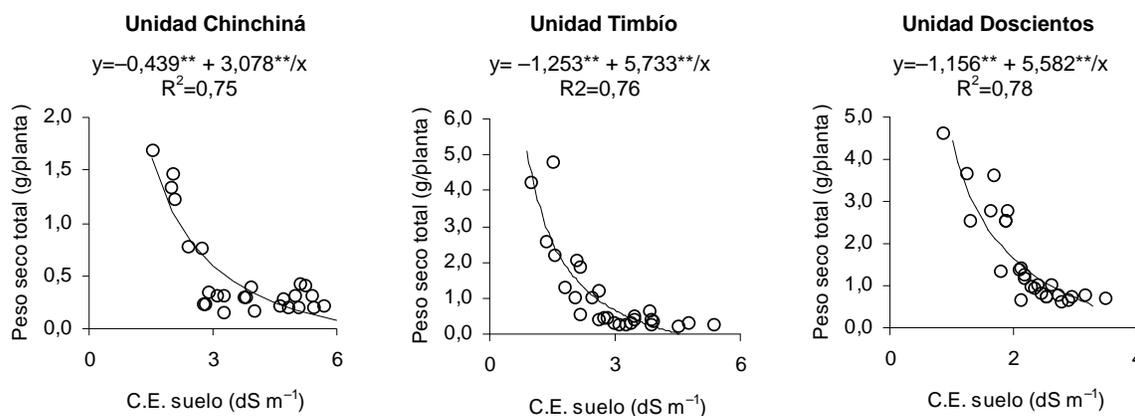


Figura 3–57. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a la conductividad eléctrica del suelo (C.E.).

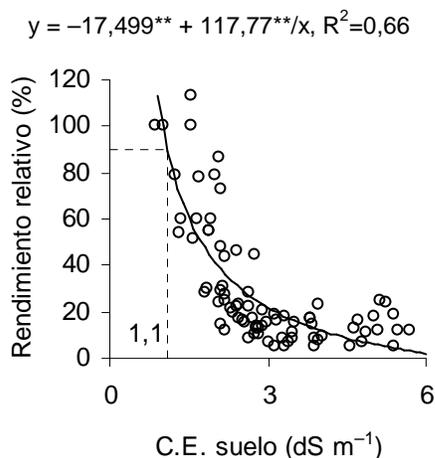


Figura 3–58. Rendimiento relativo en función de la conductividad eléctrica (C.E.). (n=81)

En resumen se puede decir que, a excepción de pocas variaciones, en las tres unidades de suelo el comportamiento de la respuesta a los tratamientos fue similar, pues en todas el desarrollo de las plantas se afectó negativamente al aplicar cualquiera de los nutrientes. Las diferencias entre estas radicarón básicamente en las interacciones de las dosis de Ca x Dosis de Mg y las Dosis de Ca x Dosis de K, pues mientras para la unidad Chinchiná no se presentaron estas interacciones, en la Doscientos y Timbío se presentó por lo menos una. La reducción promedia en el peso de las plantas fue mayor cuando se suministró Mg (69%), seguido por K (40%) y Ca (31%); efecto que se asoció principalmente a la salinidad generada por las fuentes fertilizantes; adicionalmente, al aumentar las dosis de Mg y K y/o con la aplicación simultánea de los dos elementos, las consecuencias negativas fueron aún mayores.

3.2.4 Absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ por las plantas de café en respuesta a los tratamientos

Debido a que en algunos tratamientos el peso seco del material vegetal obtenido fue muy bajo, no se pudo determinar para éstos la concentración de los nutrientes en plantas individuales. La anterior situación obligó a que se unieran las raíces, las hojas o los tallos de diferentes plantas de un mismo tratamientos con el fin de conformar una o dos muestras. En las Tabla 3–24, 3–25 y 3–26 se consignan las concentraciones de Ca, Mg y K en raíces, tallos y hojas, en respuesta a los tratamientos para las unidades Chinchiná, Timbío y Doscientos, respectivamente, y en este mismo orden, las Figuras 3–59, 3–60 y 3–61 ilustran el efecto de las dosis suministradas. Si se tienen en cuenta los diferentes órganos de la planta como indicadores para evaluar el efecto de los tratamientos, en general las hojas fueron más sensibles en comparación con las raíces y los tallos, dado que exhibieron mayores incrementos. Tomando en cuenta las concentraciones foliares como indicadores, se puede afirmar que se presentó una alta variación, tanto entre elementos como suelos, en respuesta a los tratamientos. Para Ca se registraron los siguientes rangos, de acuerdo con la unidad: Chinchiná 0,10 a 1,14, Timbío 0,22 a 0,94% y Doscientos 0,36 a 1,29%; para Mg: Chinchiná 0,13 a 1,70%, Timbío 0,10 a 1,50% y Doscientos 0,26 a 1,14%, y para K: Chinchiná 1,04 a 6,82%, Timbío 0,99 a 6,61% y Doscientos 0,99 a 3,12%. Los contenidos de Ca se asemejan a los obtenidos en otras investigaciones realizadas en Colombia y otros países productores del grano, en tanto que los del Mg y K se alejan considerablemente. Para condiciones de Brasil, Clemente et al. (2007) sugieren los siguientes rangos críticos para la época de pos-plantío de *Coffea arabica* L.: Ca 1,27% a 1,41%, Mg 0,83 a 0,90% y K 1,74% a 1,90%. Los valores sugeridos por Gonçalves et al. (2009) corresponden a: Ca 0,69 a 0,76%, Mg 0,11 a 0,12% y K 2,59 a 2,92%. En el ámbito nacional, Díaz (2006) encontró los siguientes valores para cinco suelos en la etapa de almacigo: Ca 0,81%–1,0%, Mg 0,22%–0,28%, K 2,3%–3,30%. Estos se asemejan a los detectados por Salamanca et al. (2004) para dos suelos: Ca 0,83%–1,61%, Mg 0,40%–0,41%, K 1,00%–1,50%.

Para las tres unidades de suelos las concentraciones de K fueron más altas que las de Ca y Mg; resultado que tiene su origen en la permeabilidad selectiva de las membranas radicales y la subsiguiente difusión facilitada que propicia el ingreso de este nutriente hacia el interior de las células de la planta (Marschner, 1986; Mengel y Kirkby, 2000). En este mismo sentido, Havlin et al. (1999) resalta que la toma de Ca^{2+} y Mg^{2+} por las plantas es genéticamente controlado, pues normalmente las concentraciones de estos dos elementos en la solución del suelo son varias veces mayores que las de K^+ .

La concentración de K en los tallos fue más baja que en las raíces, pese a ello, para ambos los cambios registrados en respuesta a su aplicación fueron relativamente bajos. Un comportamiento diferente se observó para las hojas, especialmente en las unidades Timbío y Chinchiná, en cuyo caso los tenores de K pasaron de 1,7% a 4,9% y 4,4%, respectivamente, mientras que en la Doscientos el incremento se dio de 1,5% a 2,8%. Lo anterior se relaciona principalmente con una menor disponibilidad del K^+ en el suelo de la unidad Doscientos, bien sea en la fase de cambio o en la solución, es decir la actividad del ión (Figura 28). Otro factor a tener en cuenta se relaciona con el efecto de la dilución de la concentración del K, debido a un mayor crecimiento de las plantas que se desarrollaron en este suelo.

Tabla 3–24. Valores promedio de la concentración de Ca, Mg y K de raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los tratamientos en la unidad Chinchiná.

— Dosis —			— Raíces —			— Tallos —			— Hojas —		
Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K
– (g dm ⁻³) –			— (%) —								
0	0	0	0,24	0,38	2,95	0,24	0,17	1,90	0,53	0,25	2,40
0	0	1	0,19	0,52	3,55	0,15	0,47	1,05	0,27	0,15	3,17
0	0	3	0,14	0,28	3,12	0,21	0,44	1,73	0,24	0,13	3,58
0	1	0	0,12	0,66	2,39	0,20	0,43	2,07	0,30	0,71	1,29
0	1	1	0,09	0,50	2,18	0,18	0,84	1,34	0,28	0,51	2,54
0	1	3	0,09	0,53	3,03	0,15	0,83	1,66	0,10	0,35	3,02
0	3	0	0,12	1,00	1,72	0,19	0,76	2,07	0,17	1,70	1,07
0	3	1	0,15	1,21	2,44	0,52	0,25	1,58	0,23	1,60	2,65
0	3	3	0,13	0,85	2,84	0,40	0,17	1,67	0,22	0,79	3,87
1	0	0	0,96	0,54	3,28	0,50	0,20	2,09	0,92	0,23	2,32
1	0	1	0,38	0,42	3,65	0,34	0,45	1,07	0,52	0,17	3,61
1	0	3	0,27	0,23	2,46	D.F.	D.F.	D.F.	0,31	0,15	6,82
1	1	0	0,33	0,61	1,70	0,34	0,51	2,40	0,60	0,83	1,41
1	1	1	0,22	0,46	2,02	0,19	0,73	1,35	0,43	0,49	2,92
1	1	3	0,24	0,55	2,78	0,23	0,61	1,52	0,40	0,51	5,67
1	3	0	0,20	0,93	1,66	0,31	0,71	2,02	0,34	1,50	1,26
1	3	1	0,21	0,81	2,17	0,60	0,30	2,02	0,27	0,99	2,35
1	3	3	0,20	0,73	2,68	0,56	0,15	1,44	0,27	0,73	3,80
3	0	0	0,86	0,47	2,80	0,49	0,21	2,43	1,14	0,26	2,34
3	0	1	0,57	0,45	2,51	0,32	0,48	1,04	0,43	0,17	3,80
3	0	3	0,29	0,22	2,48	0,35	0,47	1,56	0,61	0,22	5,29
3	1	0	0,23	0,50	1,40	0,39	0,45	2,05	0,69	0,23	1,36
3	1	1	0,26	0,52	2,15	0,24	0,76	1,07	0,49	0,53	2,94
3	1	3	0,31	0,52	2,63	0,31	0,60	1,37	0,55	0,49	3,88
3	3	0	0,17	1,06	1,65	0,28	0,72	2,36	0,29	1,40	1,04
3	3	1	0,21	0,84	2,13	0,24	0,17	1,90	0,39	1,10	1,91
3	3	3	0,24	0,81	2,55	0,15	0,47	1,05	0,34	0,82	3,60

D.F.: Dato faltante.

Tabla 3–25. Valores promedio de la concentración de Ca, Mg y K de raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los tratamientos en la unidad Timbío.

— Dosis —			— Raíces —			— Tallos —			— Hojas —		
Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K
– (g dm ⁻³) –			— (%) —								
0	0	0	0,69	0,55	3,79	0,60	0,35	1,99	0,74	0,30	2,01
0	0	1	0,43	0,55	5,00	0,48	0,32	2,88	0,57	0,22	3,50
0	0	3	0,21	0,38	4,36	0,26	0,19	2,76	0,26	0,10	5,10
0	1	0	0,21	0,70	2,12	0,26	0,55	1,58	0,49	0,62	1,72
0	1	1	0,30	0,51	2,71	0,41	0,41	1,95	0,47	0,39	3,69
0	1	3	0,26	0,51	2,83	0,41	0,40	2,10	0,45	0,34	4,15
0	3	0	0,49	1,30	1,41	0,24	0,61	1,01	0,45	1,50	0,99
0	3	1	0,29	0,67	2,51	0,25	1,09	1,82	0,39	0,84	2,43
0	3	3	0,18	0,68	2,40	0,17	0,60	2,21	0,28	0,88	4,80
1	0	0	1,06	0,45	2,91	0,77	0,29	1,92	0,90	0,20	2,28
1	0	1	0,48	0,34	3,00	0,44	0,24	2,03	0,56	0,16	3,08
1	0	3	0,28	0,34	3,02	0,36	0,16	1,90	0,30	0,11	5,21
1	1	0	0,32	0,57	2,14	0,31	0,35	1,30	0,65	0,41	1,61
1	1	1	0,22	0,34	1,79	0,28	0,30	1,77	0,43	0,35	2,84
1	1	3	0,21	0,29	2,23	0,37	0,26	1,73	0,28	0,26	4,32
1	3	0	0,21	0,57	1,53	0,27	0,44	1,03	0,39	0,83	1,26
1	3	1	0,25	0,61	1,64	0,22	0,39	1,36	0,35	0,66	2,02
1	3	3	0,20	0,56	2,51	0,28	0,49	2,45	0,30	0,62	4,50
3	0	0	0,96	0,46	2,50	1,07	0,48	2,18	0,94	0,23	2,18
3	0	1	0,34	0,32	3,02	0,49	0,25	2,07	0,59	0,18	3,12
3	0	3	0,29	0,32	3,24	1,04	0,77	2,20	0,33	0,14	5,22
3	1	0	0,25	0,63	1,85	0,37	0,50	1,60	0,54	0,60	2,20
3	1	1	0,39	1,10	2,09	0,32	0,38	1,63	0,46	0,56	2,47
3	1	3	0,28	0,44	2,31	0,35	0,37	2,12	0,24	0,35	5,61
3	3	0	0,24	0,79	1,46	0,24	0,58	1,04	0,39	0,98	1,15
3	3	1	0,16	0,66	1,75	0,20	0,56	1,54	0,33	1,00	2,21
3	3	3	0,16	0,64	2,68	0,25	0,54	2,32	0,22	0,78	4,71

Tabla 3–26. Valores promedio de la concentración de Ca, Mg y K de raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los tratamientos en la unidad Doscientos.

— Dosis —			— Raíces —			— Tallos —			— Hojas —		
Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K
– (g dm ⁻³) –			— (%) —								
0	0	0	0,60	0,49	2,48	0,43	0,36	1,81	0,76	0,33	1,53
0	0	1	0,48	0,51	2,77	0,49	0,38	1,89	0,91	0,35	2,25
0	0	3	0,40	0,46	3,42	0,43	0,35	2,21	0,71	0,27	2,99
0	1	0	0,31	0,70	2,67	0,38	0,58	1,69	0,88	0,63	1,64
0	1	1	0,28	0,60	2,47	0,32	0,54	1,81	0,73	0,55	1,98
0	1	3	0,29	0,58	2,42	0,29	0,46	1,81	0,52	0,43	2,95
0	3	0	0,25	0,83	2,09	0,28	0,74	1,38	0,57	1,03	1,30
0	3	1	0,29	0,80	2,45	0,24	0,70	1,70	0,52	0,99	1,65
0	3	3	0,29	0,81	2,77	0,26	0,70	2,06	0,37	0,84	2,78
1	0	0	0,82	0,55	2,41	0,70	0,39	1,58	1,29	0,37	1,65
1	0	1	0,56	0,52	2,81	0,48	0,35	1,67	0,90	0,34	2,23
1	0	3	0,43	0,50	3,58	0,49	0,27	1,49	0,70	0,26	2,76
1	1	0	0,36	0,62	1,84	0,38	0,56	1,43	0,93	0,73	1,34
1	1	1	0,34	0,68	2,64	0,38	0,46	1,32	0,68	0,57	1,86
1	1	3	0,30	0,60	3,03	0,32	0,40	1,46	0,52	0,48	2,78
1	3	0	0,27	0,92	1,83	0,23	0,65	1,01	0,49	1,06	1,12
1	3	1	0,28	0,63	2,01	0,29	0,55	1,09	0,49	0,72	1,60
1	3	3	0,24	0,53	2,09	0,28	0,62	1,74	0,39	0,67	2,43
3	0	0	0,80	0,53	2,46	0,68	0,44	1,44	1,22	0,35	1,72
3	0	1	0,59	0,56	2,75	0,52	0,38	1,65	0,85	0,34	2,34
3	0	3	0,41	0,54	3,15	0,48	0,30	1,78	0,64	0,27	3,12
3	1	0	0,37	0,66	2,17	0,40	0,49	1,25	0,75	0,64	1,45
3	1	1	0,34	0,67	2,53	0,39	0,50	1,29	0,63	0,65	2,01
3	1	3	0,35	0,52	2,82	0,42	0,42	1,74	0,53	0,40	2,40
3	3	0	0,28	0,91	2,15	0,25	0,58	0,99	0,49	1,14	0,99
3	3	1	0,36	0,86	2,48	0,29	0,59	1,30	0,51	1,08	1,78
3	3	3	0,26	0,92	3,08	0,26	0,53	1,39	0,36	0,86	2,83

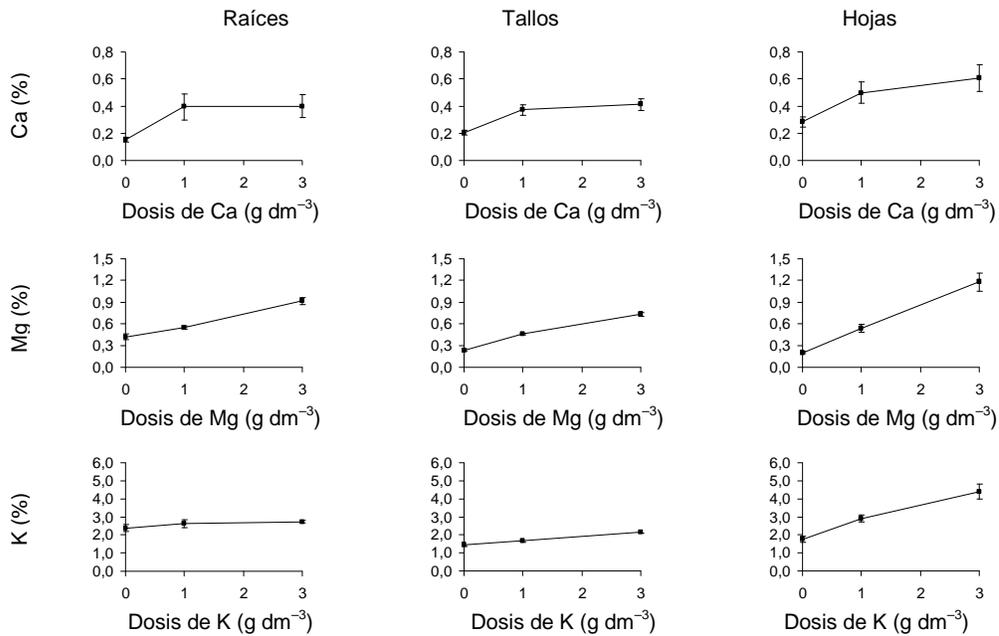


Figura 3-59. Concentración de Ca, Mg y K en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a su aplicación en la unidad Chinchiná. Las barras indican el error estándar.

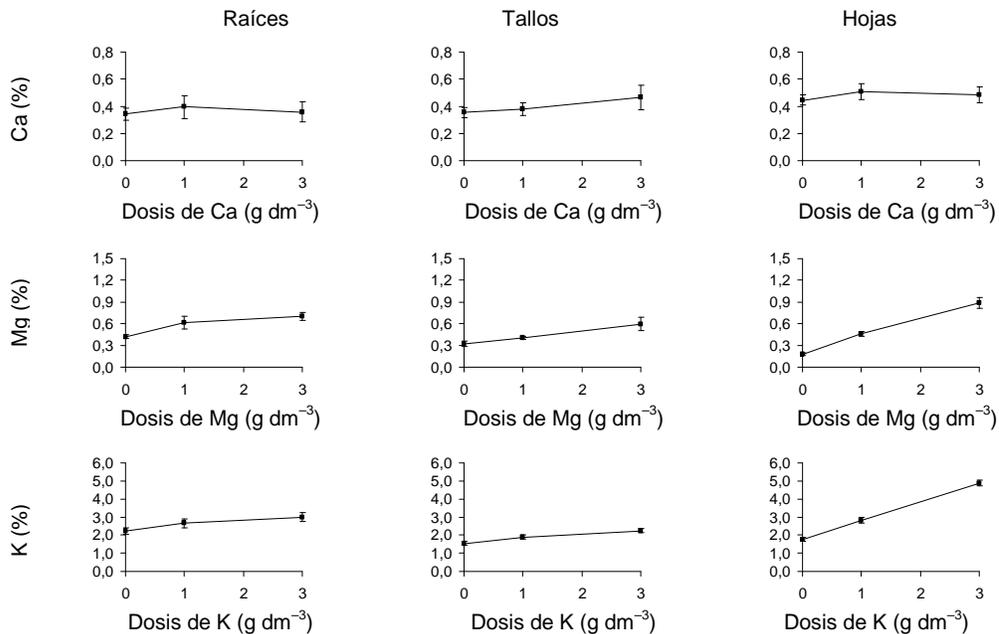


Figura 3-60. Concentración de Ca, Mg y K en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a su aplicación en la unidad Timbío. Las barras indican el error estándar.

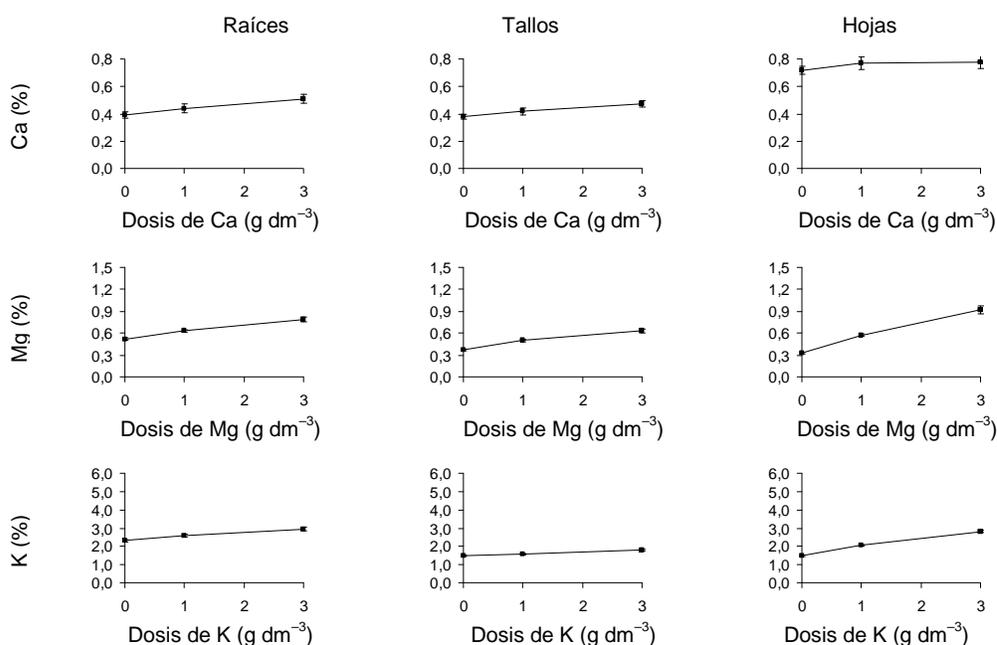


Figura 3-61. Concentración de Ca, Mg y K en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a su aplicación en la unidad Doscientos. Las barras indican el error estándar.

En la unidad Chinchiná se registraron las menores concentraciones de Ca en las diferentes partes de la planta en los tratamientos que no lo contenían, pero éstas tendieron a incrementarse con su aplicación, especialmente con la primera dosis, en tanto que en las otras dos unidades de suelos no se presentaron incrementos notorios; resultado que se puede asociar a la fertilidad nativa del suelo. La mayor concentración de Ca foliar se detectó en la unidad Doscientos, comportamiento se debe a una alta actividad del ión en la solución del suelo; en este sentido, la actividad promedia de Ca^{2+} en el tratamiento sin este elemento en la unidad Doscientos era de $6,07 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$, en tanto que Timbío fue $4,43 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ y en Chinchiná $2,80 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$. Debido a esta alta disponibilidad de Ca^{2+} en la unidad Doscientos, sus concentraciones no se incrementaron en conformidad a las dosis suministradas.

Para las tres unidades de suelos, las concentraciones de Mg fueron menores en los tallos que en las raíces, y se incrementaron con su aplicación. Aunque el Mg foliar exhibió valores similares o inferiores a los órganos en mención para la dosis cero, alcanzó niveles más altos cuando se suministró. Se puede decir que los tres suelos evaluados respondieron de una manera relativamente similar al suministro de este elemento.

3.2.5 Efecto de los contenidos y relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre el crecimiento de café y la toma de estos nutrientes

En esta fase del trabajo se empleó el análisis de regresión para evaluar el efecto de los contenidos y las relaciones de las bases intercambiables del suelo sobre el crecimiento y la nutrición de café en la etapa de almácigo. Para lo anterior se utilizaron los resultados obtenidos en todos los tratamientos aplicados, es decir 27 en cada unidad de suelo.

Para los resultados que se presentan a continuación se asumirá que los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , detectados por el análisis de laboratorio como intercambiables, tienen tal naturaleza. Esta premisa, aunque no es cierta en su totalidad, es necesaria para poder discutir el principal problema objeto de este estudio.

3.2.5.1 Crecimiento de las plantas en respuesta a los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables y en la solución del suelo

Para ninguno de los suelos objeto de estudio se encontró relación entre el peso seco total de las plantas y el contenido de Ca^{2+} en el complejo de cambio (Figura 3–62). Esta tendencia difiere de los resultados anteriormente presentados acerca del efecto negativo de las dosis de Ca –solo o en interacción con Mg y K– sobre el crecimiento de las plantas. Dada la alta correlación entre las dosis suministradas y el contenido de Ca^{2+} intercambiable, se hubiera esperado que los incrementos de este elemento en la fase de cambio también se reflejaran en una reducción de la biomasa de las plantas, lo cual no ocurrió. La anterior diferencia se debe a que con el ANAVA se logró separar el efecto de la dosis de cada elemento y su interacción, mientras que en el análisis de regresión se incluyeron todos los tratamientos de manera simultánea; en este sentido, se puede decir que la falta de correlación indica que el contenido del elemento en su forma intercambiable por sí solo no explicó las variaciones del peso seco.

De acuerdo con Valencia (1999), niveles de Ca^{2+} superiores a $4,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, pueden ocasionar problemas nutricionales en las plantas de café; en contraste, Chaves (2002) y Díaz (2006), sostienen que para la etapa de almácigo, contenidos superiores a $7,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ pueden resultar hasta benéficos, lo cual coincide de alguna manera con los criterios establecidos para la mayoría de los cultivos en Colombia (ICA, 1992; Estrada 2001). Por lo tanto, en las unidades Chinchiná y Timbío, caracterizadas por sus bajos contenidos de este elemento (menores a $3,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), se hubiera esperado un efecto positivo de la dosis baja de Ca, con la cual se logró elevar su fracción intercambiable hasta $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Con base en lo expuesto, no se puede asociar el efecto detrimental observado sobre el crecimiento de las plantas a los altos niveles de Ca sino a la salinidad que generó la fuente empleada (yeso), aunque su magnitud fue inferior a los sulfatos de Mg y K (Figura 3–21).

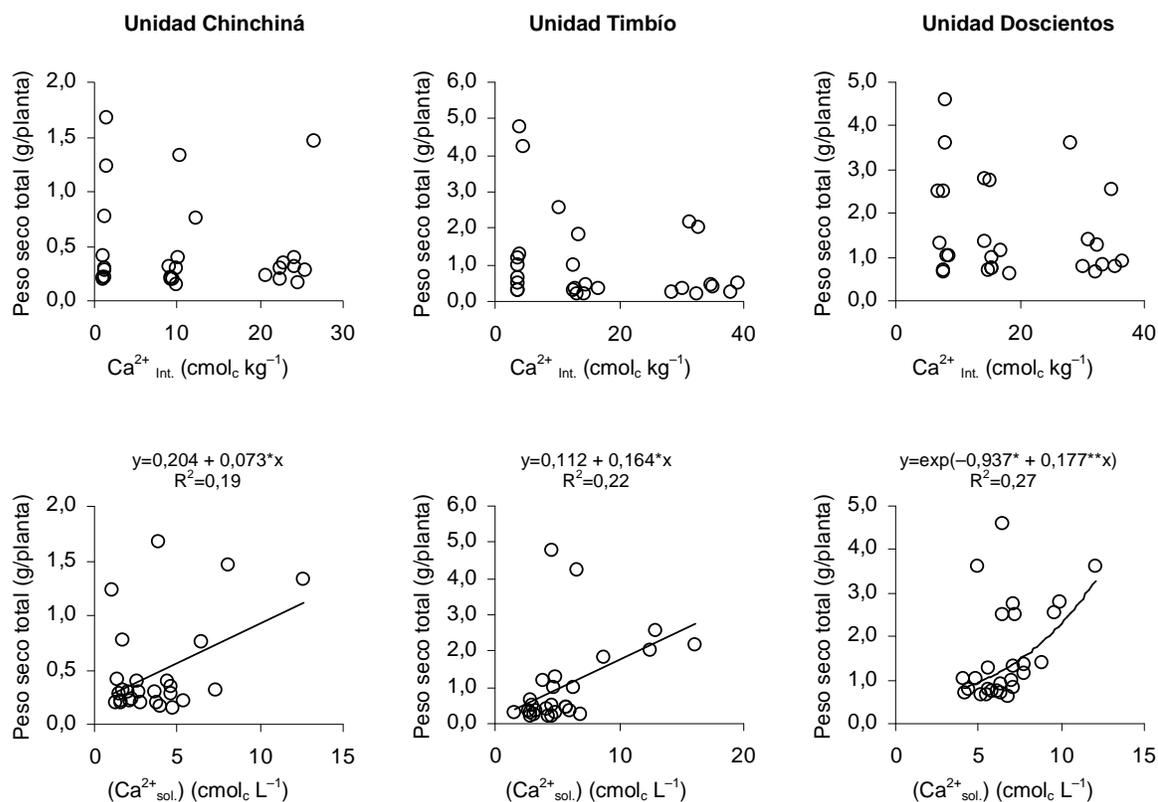


Figura 3–62. Peso total de las plantas de café en respuesta al contenido de Ca^{2+} intercambiable – $Ca^{2+}_{Int.}$ – y actividad de Ca^{2+} en la solución del suelo ($Ca^{2+}_{Sol.}$).

En cuanto a la actividad de Ca^{2+} se refiere, se logró explicar entre el 19 y 27% de las variaciones del peso de las plantas a través de esta variable (Figura 3–62). Aunque esta relación no es estrecha, sugiere un comportamiento contrario al obtenido con las dosis aplicadas. La baja correlación entre el Ca^{2+} intercambiable y su actividad en la solución (Figura 3–34), sumado al hecho que fue la actividad de Ca^{2+} que explicó más los cambios del peso de las plantas, postulan a esta fracción como un mejor indicador para su disponibilidad. También quedó demostrado que la actividad de Ca^{2+} estuvo influenciada por la presencia de Mg^{2+} y K^+ en el suelo (Figura 3–35), dada la alta solubilidad de las fuentes empleadas de estos elementos y la formación y posterior precipitación de Ca, en respuesta a una saturación de los iones SO_4^{2-} y su menor constante de solubilidad (Lindsay, 2001).

En las tres unidades de suelo el crecimiento de las plantas tendió a reducirse con los aumentos de Mg^{2+} en la fase intercambiable y en la solución del suelo (Figura 3–63), sin que los ajustes de los molelos fueran muy altos, en particular para la unidad Chinchiná. Para el caso de K^+ , se detectó un efecto similar, pero con tendencias menos claras, especialmente para los suelos de las unidades Doscientos y Timbío (Figura 3–64).

Según los criterios establecidos para Colombia (Sadeghian, 2008) y otros países productores de café (Carvajal, 1984; Chaves, 2002; CRF, 1990; Palma, 1994), son muy elevados los contenidos

intercambiables de Mg^{2+} y K^+ en el suelo; aún los alcanzados con la primera dosis (1 g dm^{-3}). Debido a ello, se espera que una parte de la disminución en el peso de las plantas se deba precisamente a los desequilibrios nutricionales generados en el medio edáfico; sin embargo, y como ya se discutió, otra parte obedece en buena medida al efecto salino de los fertilizantes potásico y magnésico aplicados (Figuras 3–56 y 3–57); por lo tanto, resulta evidente que la respuesta en la biomasa de las plantas al suministro de estos dos elementos de manera conjunta sea más ajustada que la respuesta individual de cada uno (Figura 3–65).

Las curvaturas más “moderadas” de los modelos obtenidos para la unidad Doscientos, en respuesta a los contenidos de Mg^{2+} y/o K^+ en el suelo, se relacionan con su menor C.E.; debido a ello, las diferencias registradas no se pueden relacionar con la preferencia de los suelos por los elementos objeto de estudio. Además, es preciso recordar que en ninguno de los suelos se logró el equilibrio entre el contenido de los elementos en la solución y el complejo de cambio, requisito para determinar la selectividad catiónica (Bohn et al., 2001; Essington, 2004; Sparks, 2003).

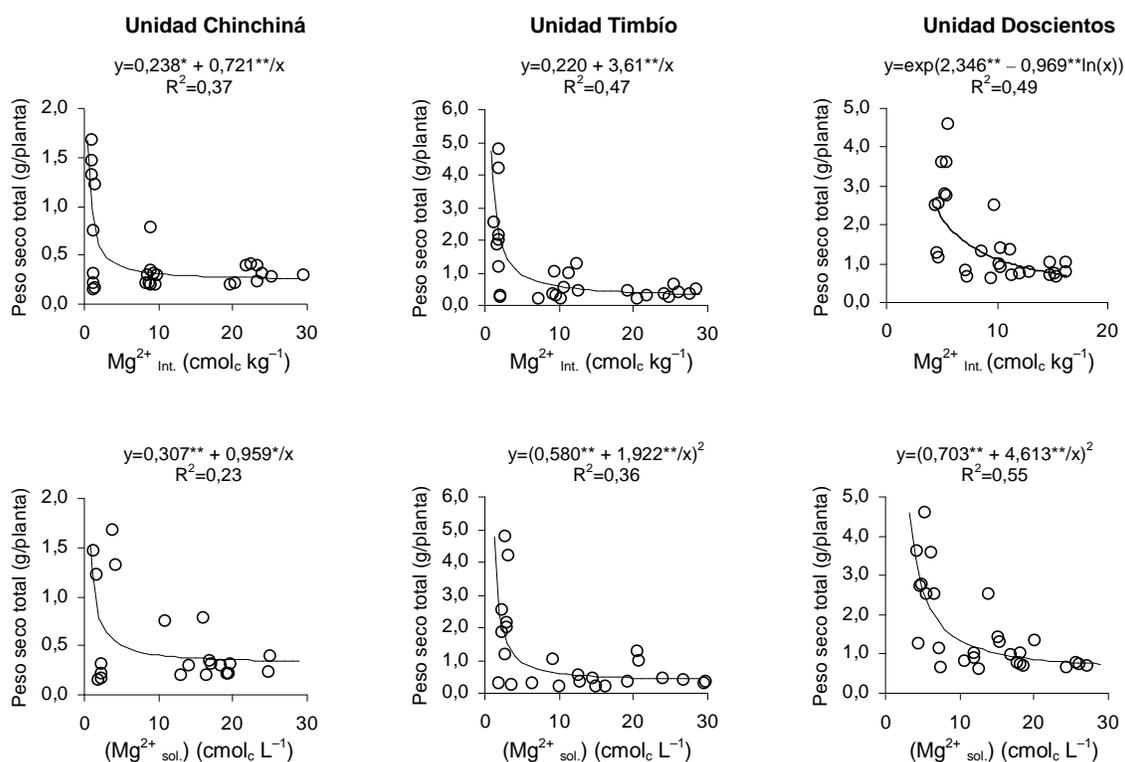


Figura 3–63. Peso total de las plantas de café en respuesta al contenido de Mg^{2+} intercambiable – $Mg^{2+}_{\text{Int.}}$ – y actividad de Mg^{2+} en la solución del suelo ($Mg^{2+}_{\text{sol.}}$).

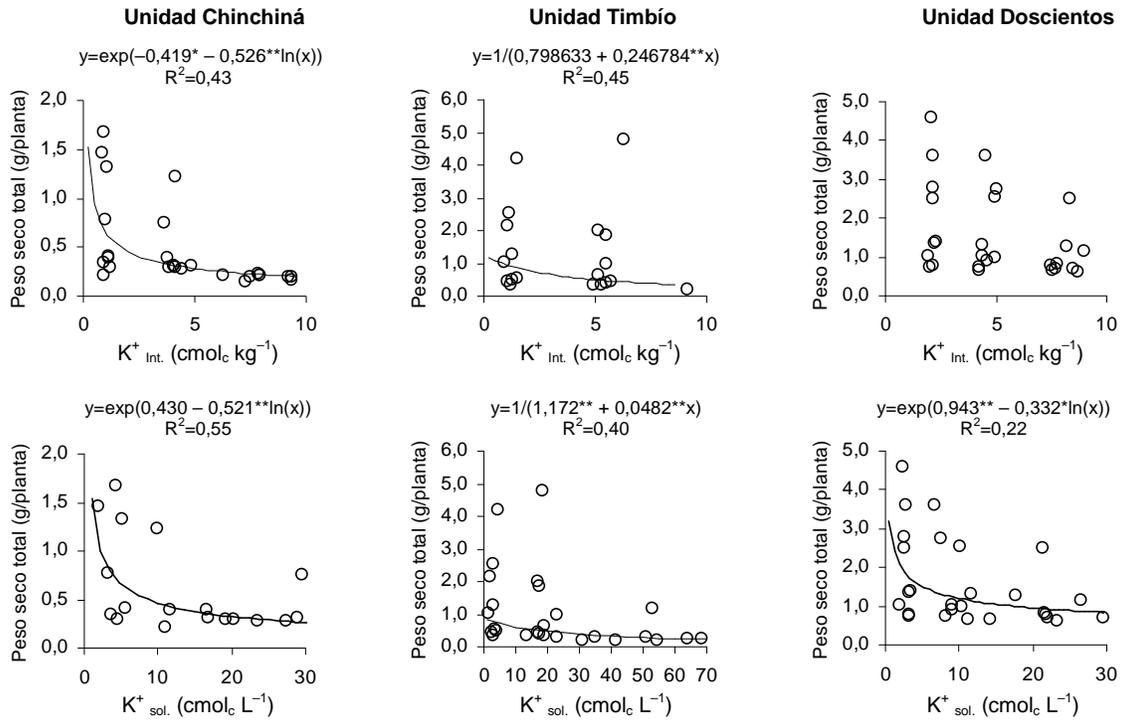


Figura 3–64. Peso total de las plantas de café en respuesta al contenido de K^+ intercambiable $-K^+$ Int.– y actividad de K^+ en la solución del suelo (K^+ sol.).

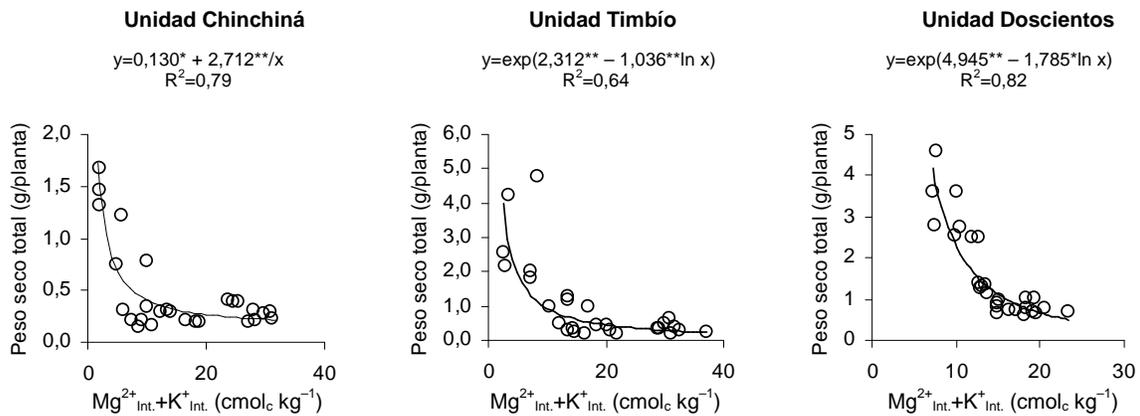


Figura 3–65. Peso seco total de las plantas de café en respuesta al contenido de Mg^{2+} y K^+ intercambiables.

3.2.5.2 Concentración de Ca, Mg y K en la planta de café en respuesta a sus contenidos en la fase intercambiable y en la solución del suelo

En la Figura 3–66 se observa el efecto de los contenidos de Ca^{2+} intercambiable y la actividad de Ca^{2+} en la solución sobre su concentración en los órganos de la planta de café para el conjunto de los datos en las tres unidades de suelo. A este nivel de detalle no se encontró relación alguna entre la concentración de Ca en la planta y su contenido en la fase de cambio; en contraste, la actividad de Ca^{2+} sí explicó las variaciones registradas, independiente del órgano. Lo expuesto revela la poca correlación entre las dos fases (Figura 3–34), y corrobora nuevamente que para las condiciones de este estudio la fracción intercambiable de Ca^{2+} no fue un buen indicador de su disponibilidad. Debido a que en ocasiones como esta existen serios problemas para diagnosticar el estado de la fertilidad del suelo, Barber (1995) plantea la necesidad de realizar monitoreos simultáneos en las dos fases.

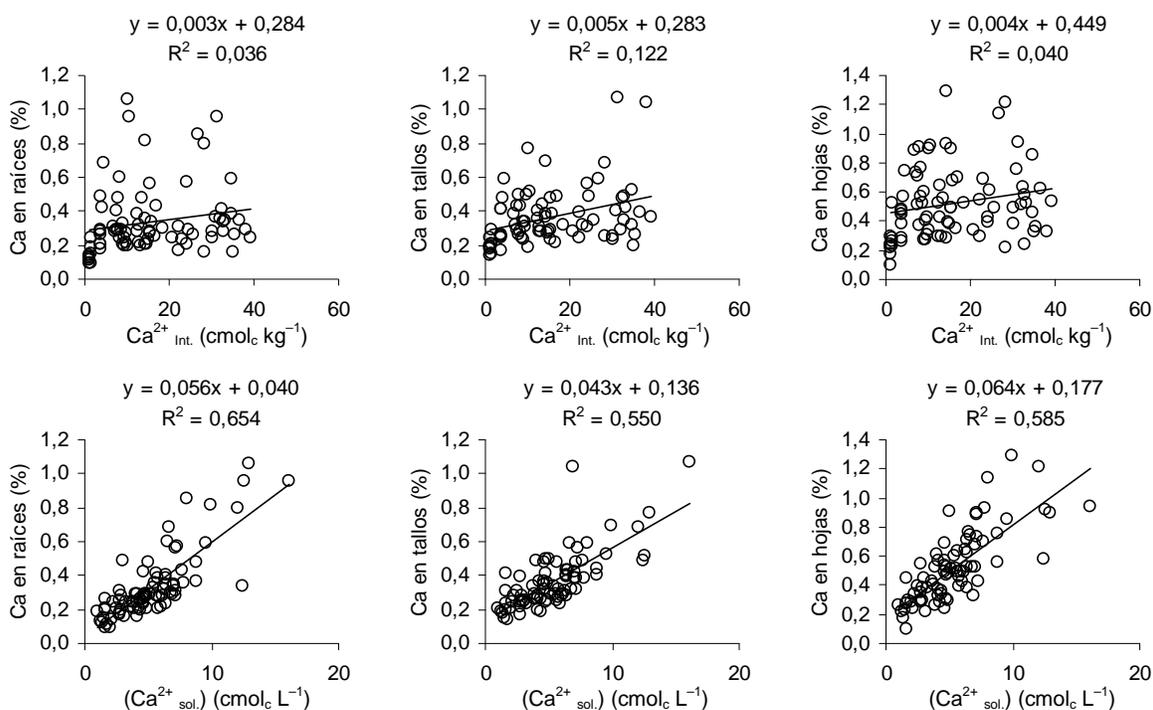


Figura 3–66. Concentración de Ca en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los contenidos de Ca^{2+} intercambiable – $\text{Ca}^{2+}_{\text{int.}}$ – y actividad de Ca^{2+} en la solución ($\text{Ca}^{2+}_{\text{sol.}}$). (n=81).

Para el Mg^{2+} , las dos fracciones pudieron predecir de manera razonable los incrementos de la concentración de Mg en la planta, siendo ligeramente mejor el ajuste de los modelos lineales para las hojas (Figura 3–67). Las variaciones en las concentraciones de K en las raíces no pudieron ser explicadas por sus contenidos intercambiables en el suelo ni por su actividad en la solución (3–68). Estas fracciones tampoco fueron muy buenos indicadores de los niveles de K en los tallos, mientras que sí explicaron sus cambios en las hojas. El anterior comportamiento, de acuerdo con Mengel y Kirkby (2000) se relaciona con una mayor demanda de K por las hojas para los diferentes procesos metabólicos que allí ocurren.

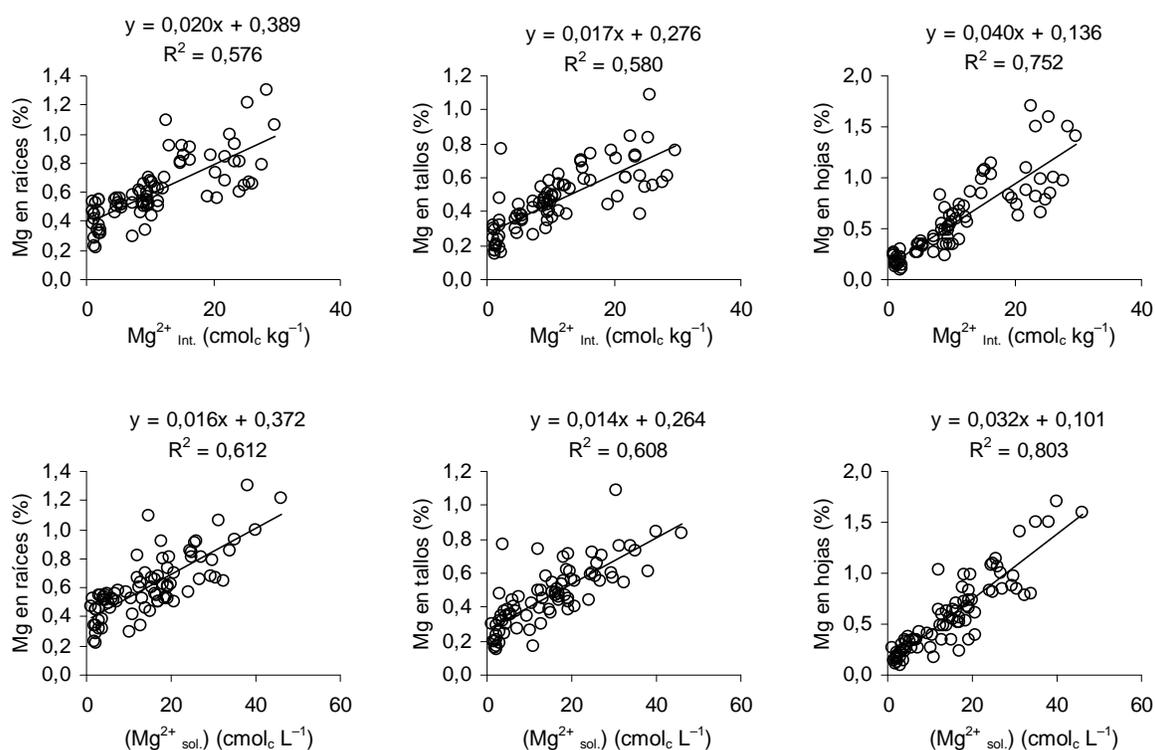


Figura 3–67. Concentración de Mg en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los contenidos de Mg^{2+} intercambiable $-Mg^{2+}_{int.}$ y actividad de Mg^{2+} en la solución ($Mg^{2+}_{sol.}$) (n=81).

En el trabajo desarrollado por Díaz (2006) en cinco suelos de la región cafetera de Colombia sobre encalamiento, también se encontró una relación lineal entre los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables y las concentraciones foliares en la etapa de almácigo. Para Mg, Henao et al. (1995) pudieron explicar los contenidos foliares tanto en función de los contenidos del elemento en la fase de cambio como en la solución; por el contrario, Cadena (2004), no siempre logró establecer relación entre estas dos fases y los niveles foliares de Ca, Mg y K en raíces y hojas de café. Henao y Hernández (2002) indican que las variaciones foliares de K pueden explicarse en función de los contenidos del elemento en la fase de cambio y en la solución a través de una ecuación polinomial de segundo grado; comportamiento que difiere a las tendencias lineales en este estudio; divergencia que puede ser el resultado de la sobre-fertilización, pues de acuerdo con los reportes de Sadeghian y Álvarez (2010), mientras que el contenido de K^+ intercambiable en el suelo se incrementa de manera lineal en respuesta a las dosis medias a altas del fertilizante potásico (100 a 400 kg⁻¹ ha⁻¹ año⁻¹ de K_2O), la concentración de K foliar sigue una tendencia cuadrática.

El ajuste de los modelos lineales $-R^2-$ obtenidos para cada unidad de suelo, sumado a la significancia de las pendientes de las correspondientes rectas, indican que el comportamiento general descrito también se cumple para cada uno de suelos estudiados (Tabla 3–27). Con algunas excepciones, las pendientes de las ecuaciones fueron similares, lo cual muestra que la concentración de los tres nutrientes evaluados guarda relación con su disponibilidad en el suelo.

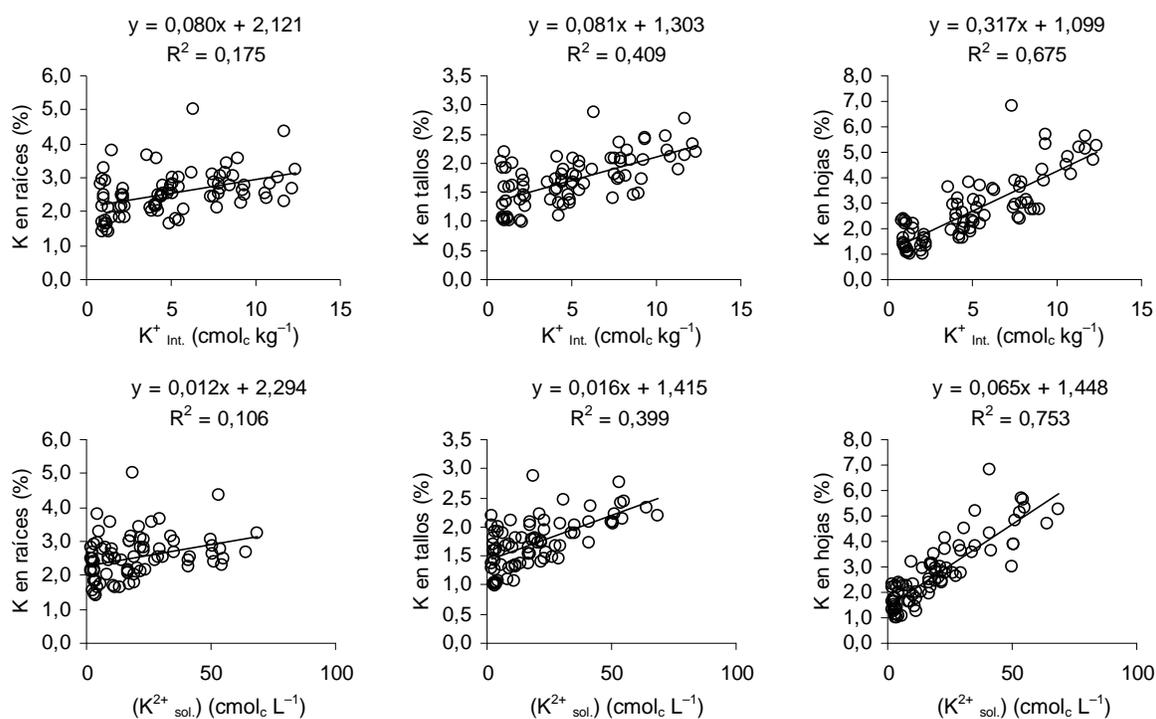


Figura 3-68. Concentración de K en raíces, tallos y hojas de café en respuesta a los contenidos de K⁺ intercambiable –K⁺ int.– y actividad de K⁺ en la solución (K⁺ sol.) (n=81).

La principal diferencia entre los suelos se detectó en la concentración de K en las raíces, pues mientras que para las unidades Chinchiná y Timbío no se encontró relación alguna entre esta variable y los contenidos de K⁺ en la fase de cambio ni en la solución, en la unidad Doscientos sí se halló; comportamiento que se reflejó tanto en una mayor pendiente de la ecuación de la recta como en la significancia de esta. La disparidad en referencia puede resultar de una posible interacción entre un mayor porcentaje de microporos en la unidad Doscientos (Tabla 3-15), y el mecanismo mediante el cual el K⁺ establece contacto con la raíz, posiblemente representado por la difusión. Amézquita (2001), explica que mediante el proceso de difusión el elemento se mueve distancias muy cortas dentro de una fase acuosa estacionaria, de una región de alta concentración del nutriente a otra de baja concentración muy cercana a la superficie de la raíz. Existe una relación estrecha entre estos procesos y la distribución de tamaño de poros, la interceptación ocurre fundamentalmente en los macroporos, el flujo de masa por los mesoporos y la difusión por los microporos. De acuerdo con lo anterior, se espera que la relación de K⁺ frente al Ca²⁺ y Mg²⁺ también se viera afectada por la distribución del tamaño de los poros.

El suelo de la unidad Timbío fue seleccionado debido a su selectividad por el Ca²⁺; sin embargo, no se logró establecer relación entre la toma de este nutriente por parte de la planta y la preferencia catiónica, medida en términos de la fase intercambiable. En cuanto al Mg²⁺, tanto para la unidad Chinchiná como para Doscientos se presentó una alta correlación entre el contenido intercambiable y la concentración en las diferentes partes de la planta; siendo más selectiva por el Mg²⁺ la unidad Chinchiná. Para el suelo de la unidad Doscientos hubo correlación entre el K⁺ intercambiable y la

Tabla 3–27. Modelos lineales para explicar las variaciones de la concentración porcentual de Ca, Mg y K en raíces, tallos y hojas en función de sus contenidos en la fase intercambiable y en la solución, obtenidos para las unidades de suelos evaluadas.

Elemento – parte planta	Unidad Chinchiná		Unidad Timbío		Unidad Doscientos	
	Modelo	R ²	Modelo	R ²	Modelo	R ²
Ca – raíz	$\hat{y} = 0,163^* + 0,010^* \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,19	$\hat{y} = 0,360^{**} - 0,001 \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,25	$\hat{y} = 0,360^{**} + 0,002 \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,11
Ca – tallo	$\hat{y} = 0,200^* + 0,009^* \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,35	$\hat{y} = 0,314^{**} + 0,005 \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,07	$\hat{y} = 0,352^{**} + 0,002 \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,22
Ca – hoja	$\hat{y} = 0,262^{**} + 0,0135^* \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,31	$\hat{y} = 0,466^{**} - 0,0017 \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,002	$\hat{y} = 0,717^{**} - 0,002 \text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,78
Mg – raíz	$\hat{y} = 0,343^{**} + 0,024^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,84	$\hat{y} = 0,373^{**} + 0,016^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,43	$\hat{y} = 0,341^{**} + 0,032^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,81
Mg – tallo	$\hat{y} = 0,224^{**} + 0,022^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,89	$\hat{y} = 0,292^{**} + 0,012^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,36	$\hat{y} = 0,220^{**} + 0,028^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,82
Mg – hoja	$\hat{y} = 0,121 + 0,045^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,81	$\hat{y} = 0,098^* + 0,033^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,86	$\hat{y} = -0,044 + 0,068^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$	0,96
K – raíz	$\hat{y} = 2,178^{**} + 0,068 \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,12	$\hat{y} = 2,106^{**} + 0,074 \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,13	$\hat{y} = 1,958^{**} + 0,123^{**} \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,50
K – tallo	$\hat{y} = 1,162^{**} + 0,114^{**} \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,41	$\hat{y} = 1,445^{**} + 0,071^{**} \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,39	$\hat{y} = 1,267^{**} + 0,058^{**} \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,24
K – hoja	$\hat{y} = 1,247^{**} + 0,389^* \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,68	$\hat{y} = 1,233^{**} + 0,318^{**} \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,90	$\hat{y} = 0,926^{**} + 0,228^* \text{K}^{+}_{\text{Int.}}$	0,86
Ca – raíz	$\hat{y} = 0,004 + 0,073^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,88	$\hat{y} = 0,063 + 0,050^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,58	$\hat{y} = -0,025 + 0,062^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,54
Ca – tallo	$\hat{y} = 0,172^{**} + 0,038^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,62	$\hat{y} = 0,117 + 0,050^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,54	$\hat{y} = 0,034 + 0,053^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,61
Ca – hoja	$\hat{y} = 0,155^{**} + 0,071^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,65	$\hat{y} = 0,215^{**} + 0,043^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,61	$\hat{y} = 0,017 + 0,099^{**} (\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,60
Mg – raíz	$\hat{y} = 0,307^{**} + 0,018^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,83	$\hat{y} = 0,361^{**} + 0,014^{**} \text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}}$	0,46	$\hat{y} = 0,437^{**} + 0,016^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,64
Mg – tallo	$\hat{y} = 0,194^{**} + 0,016^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,87	$\hat{y} = 0,281^{**} + 0,011^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,39	$\hat{y} = 0,306^{**} + 0,014^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,63
Mg – hoja	$\hat{y} = 0,040^{**} + 0,035^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,83	$\hat{y} = 0,085^* + 0,029^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,87	$\hat{y} = 0,157^{**} + 0,033^{**} (\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$	0,76
K – raíz	$\hat{y} = 2,217^{**} + 0,011 (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,10	$\hat{y} = 2,235^{**} + 0,014 (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,10	$\hat{y} = 2,183^{**} + 0,034^{**} (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,42
K – tallo	$\hat{y} = 1,220^* + 0,018^{**} (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,37	$\hat{y} = 1,562^{**} + 0,014^{**} (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,33	$\hat{y} = 1,379^{**} + 0,015^* (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,19
K – hoja	$\hat{y} = 1,400^{**} + 0,064^{**} (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,65	$\hat{y} = 1,701^{**} + 0,063^{**} (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,83	$\hat{y} = 1,358^{**} + 0,061^{**} (\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$	0,71

$\text{Ca}^{2+}_{\text{Int.}}$, $\text{Mg}^{2+}_{\text{Int.}}$ y $\text{K}^{+}_{\text{Int.}}$: Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} intercambiables, respectivamente, expresados en $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

$(\text{Ca}^{2+}_{\text{Sol.}})$, $(\text{Mg}^{2+}_{\text{Sol.}})$ y $(\text{K}^{+}_{\text{Sol.}})$: actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la solución, respectivamente, expresados en $\text{cmol}_c \text{L}^{-1}$.

toma de este por las raíces, en tanto que para Chinchiná se observó un comportamiento contrario; respuesta que concuerda con los criterios de su selectividad. Ahora bien, pese a lo anterior, no hay evidencias claras que puedan atribuir contundentemente las diferencias halladas en la concentración de los nutrientes a la naturaleza selectiva del complejo de cambio; menos aún, cuando se ha discutido acerca de las imprecisiones en las valoraciones analíticas.

3.2.5.3 Crecimiento de las plantas en respuesta a las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ y sus porcentajes de saturación

En ninguna de las tres unidades de suelo los cambios en las relaciones más utilizadas en el manejo de la fertilidad del suelo, es decir Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K en la fase intercambiable, lograron explicar las variaciones del peso seco total de las plantas (Figura 3–69). La anterior respuesta indica que para las condiciones de esta investigación fueron otras variables, diferentes a las relaciones en referencia, las que determinaron el crecimiento de café.

Con base en la anterior respuesta se rechaza la hipótesis planteada en torno al efecto de los cambios en las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable sobre el crecimiento de café en la etapa de almácigo.

Este resultado pone entredicho la propuesta de Bear y Toth (1948), quienes por primera vez sugirieron que idealmente un suelo debería presentar las siguientes relaciones en el complejo de intercambio para soportar buenos rendimientos: Ca:Mg 6,5:1, Ca:K 13:1 y Mg:K 2:1. En la Figura 3–69 se observa que para todas las relaciones objeto de estudio fue posible lograr proporciones cercanas a las sugeridas por Bear y Toth (1948); sin embargo, antes que dichas relaciones fueron las cantidades de los elementos presentes en el suelo y la naturaleza de las fuentes fertilizantes las que determinaron en últimas las tendencias registradas. Cabe resaltar entonces que la falta de correlación entre las variables analizadas concuerda con lo obtenido por Bertsch et al. (1991) para café y por Jiménez (2005), Liebhardt (1981), Mc Lean y Carbonell (1972), Muchovej et al. (1986), Oliveira (1993) y Oliveira y Parra (2003) para otros cultivos. En contraste, los resultados obtenidos difieren a los hallados para café por Corrêa et al. (2007), García (1981) y Malavolta (2006), quienes reportan efecto de por lo menos una de estas relaciones.

Se pueden cuestionar los resultados presentados, basándose en las imprecisiones del método de extracción y la sobrevaloración de los contenidos intercambiables de las bases analizadas; no obstante, se debe resaltar que esta circunstancia representa una situación frecuente tanto en Colombia (León, 2001; Sadeghian, 2003) como en otros países (Raij et al., 1982; Soratto et al., 2008), y constituye uno de los retos de la ciencia del suelo en cuanto a las metodologías confiables se refiere. Debido a las implicaciones que tiene la calidad de las enmiendas y los abonos sobre las determinaciones analíticas y su efecto residual, Jarvan (2004) sostiene que los contenidos y las relaciones entre Ca, Mg y K deben analizarse a la luz de tipo de material encalante o fertilizante.

En concordancia con lo anterior, Kopitke y Menzies (2007), examinaron los datos de numerosos estudios, particularmente los de Bear y Toth (1948), y tampoco hallaron méritos que relacione la fertilidad del suelo con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, dentro de rangos que comúnmente se encuentran en los suelos. Estos autores concluyen que la promoción del concepto de la relación de la saturación de las bases intercambiables resulta en el uso ineficiente de

los recursos en la agricultura. Agregan que en muchas ocasiones, el incremento de la producción se relaciona más con los cambios en el pH del suelo (por ejemplo cuando se encala), y la subsiguiente mejoría en la actividad microbiana o fijación biológica de nitrógeno.

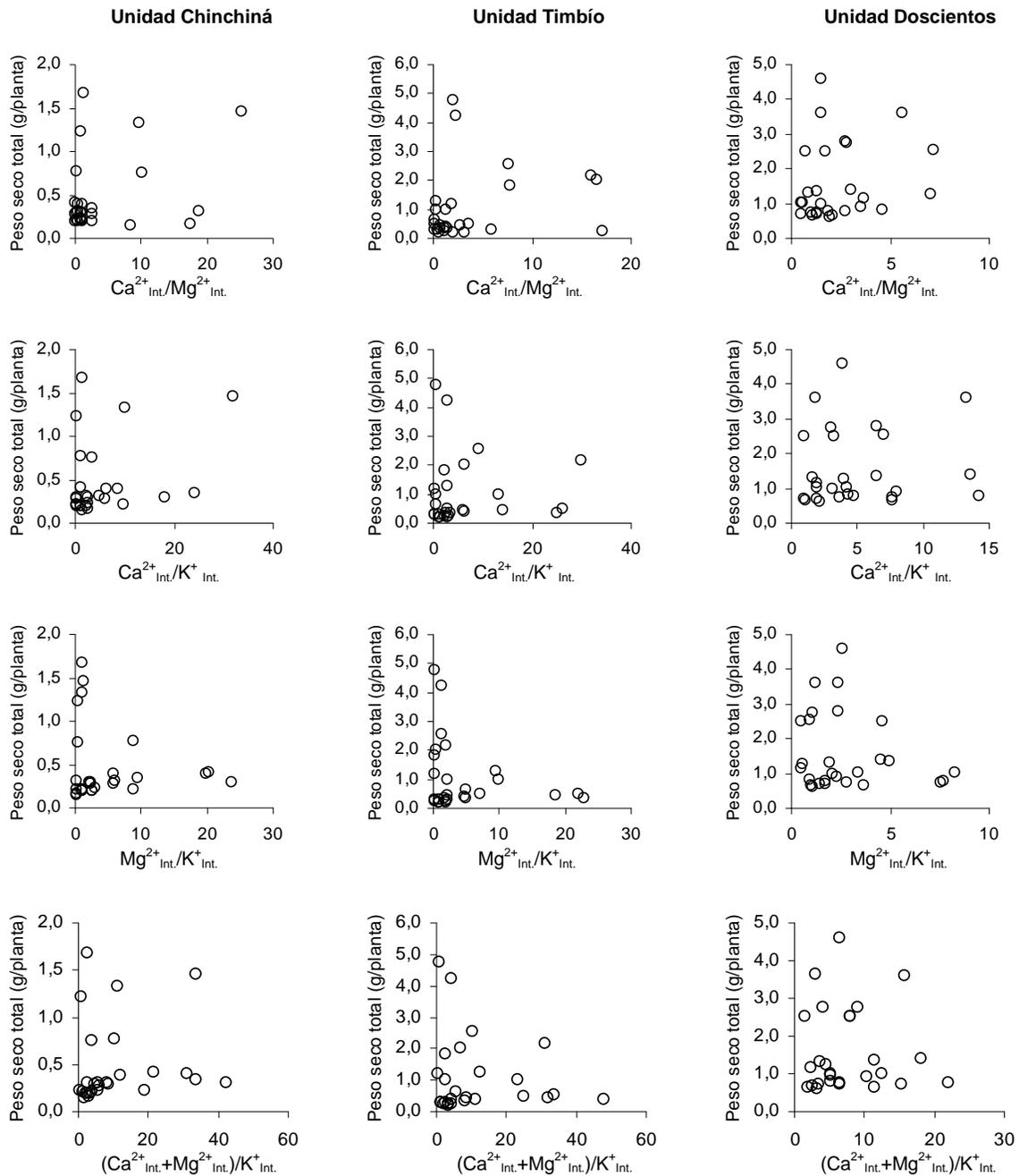


Figura 3-69. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a las relaciones Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y Ca+Mg/K en la fase intercambiable.

Referente a las relaciones que involucran al Ca^{2+} , la respuesta obtenida apenas resulta obvia, dado que el valor reportado para este elemento no corresponde en su totalidad a la fracción realmente intercambiable, y que una parte se halla bajo otras formas diferentes a la fracción labil del suelo, principalmente la forma precipitada. El anterior racionamiento, como se ha venido discutiendo, tiene su origen en factores como: i) la relativa baja solubilidad de sulfato de Ca que limita su disolución, ii) la elevada presencia de aniones libres en la solución (principalmente sulfatos y nitratos), provenientes de fertilizantes muy solubles empleados (DAP y sulfatos de Mg y K) que se unen al Ca^{2+} , causando su precipitación o lavado, y iii) la incapacidad del extractante en separar la fracción intercambiable de otras formas del elemento presentes en el suelo, bien sea en la solución o en forma de compuestos precipitados.

Para el cultivo de café, el cuadro descrito puede ser más “la regla” que “la excepción”, en especial cuando se emplean fertilizantes solubles para suplir los requerimientos de K y N, luego de realizar prácticas de encalamiento con productos poco solubles –tipo cales– con la finalidad de corregir la acidez y proporcionar Ca^{2+} y/o Mg^{2+} . En situaciones como esta, se espera que las relaciones que se derivan de los resultados de laboratorio también contengan imprecisiones, dado que a través de ellas se establecen razones entre las cantidades de los elementos que no necesariamente se hallan en la fase de cambio. En resumen, se puede decir que la validez de los cocientes depende necesariamente de la calidad de los valores analíticos que los generan, pues si los contenidos intercambiables no corresponden a la realidad, las relaciones tampoco lo harán.

Con respecto a las relaciones que se derivan de Mg^{2+} y K^+ , es decir Mg/K y (Ca+Mg)/K, el análisis de regresión tampoco reveló evidencias que comprometiera el crecimiento de las plantas en función estas en la fase de cambio (Figuras 3–69). A pesar de la naturaleza soluble de las fuentes empleadas para proporcionar estos dos elementos, se espera que solo una parte de ellos esté ligada al complejo adsorbente, en tanto que el resto se encuentra en la solución o en forma precipitada dentro de la matriz del suelo en consecuencia de las altas interacciones interiónicas. La condición descrita fue explicada a través de los modelos de regresión encontrada para las concentraciones y las actividades (Figura 3–32), y tiene su origen en el exceso de los fertilizantes y la insuficiencia de riego para lavarlos o establecer un equilibrio definitivo.

En la Figura 3–70 se pueden observar para cada unidad de suelo las variaciones del peso seco de las plantas en función de los porcentajes de saturación de Ca^{2+} , Mg^{2+} o K^+ en la fase intercambiable. Cabe aclarar que en muchas ocasiones los valores de estas saturaciones se calculan a partir de la CIC, determinada en el laboratorio mediante la extracción con acetato de amonio normal y neutro (ICA, 1992, Havlin et al., 1999); sin embargo, para el caso de esta investigación no se hizo así, dado que para las dosis altas de Ca y Mg los contenidos intercambiables excedían a la CIC.

Para los tres suelos fue posible contar con valores desde muy bajos –cerca de 1,0– hasta muy altos –más de 50,0– de los porcentajes de saturación de los tres elementos evaluados; pese a ello, la dispersión de datos fue alta y sin tendencia alguna. Por lo tanto, no fue posible demostrar que la proporción relativa de Ca^{2+} , Mg^{2+} o K^+ con respecto a la CICE, pudiera afectar el crecimiento de las plantas en término de su peso seco total; resultado que coincide con lo obtenido para las relaciones entre las bases intercambiables. Esta respuesta también difiere a la propuesta de Bear y Toth (1948), quienes sustentaron por primera vez que idealmente un suelo debe presentar los siguientes niveles de saturación de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el complejo de intercambio para que pueda soportar buenos rendimientos: 65%, 10% y 5% respectivamente. Los datos obtenidos tampoco coinciden con los

presentados por Corrêa et al. (2007) y Oliveira et al. (1994) para café, o con los de Lopera et al. (1979), Moreira et al. (2005), Silva (1980), Silva y Meurer (1988) y Taira et al. (2004) para otros cultivos. En contraste, sí concuerdan con los de Liebhardt (1981) quien demostró que estos parámetros no garantizan un incremento en la producción, y que incluso pueden afectar de manera negativa la rentabilidad del renglón al aumentar los costos de producción. Nuevamente se debe repetir que las relaciones entre las bases intercambiables o los porcentajes de saturación por sí solos no fueron suficientes para explicar las variaciones de la producción de la biomasa, y que se requiere por lo tanto de información adicional para disertar más certeramente acerca del tema.

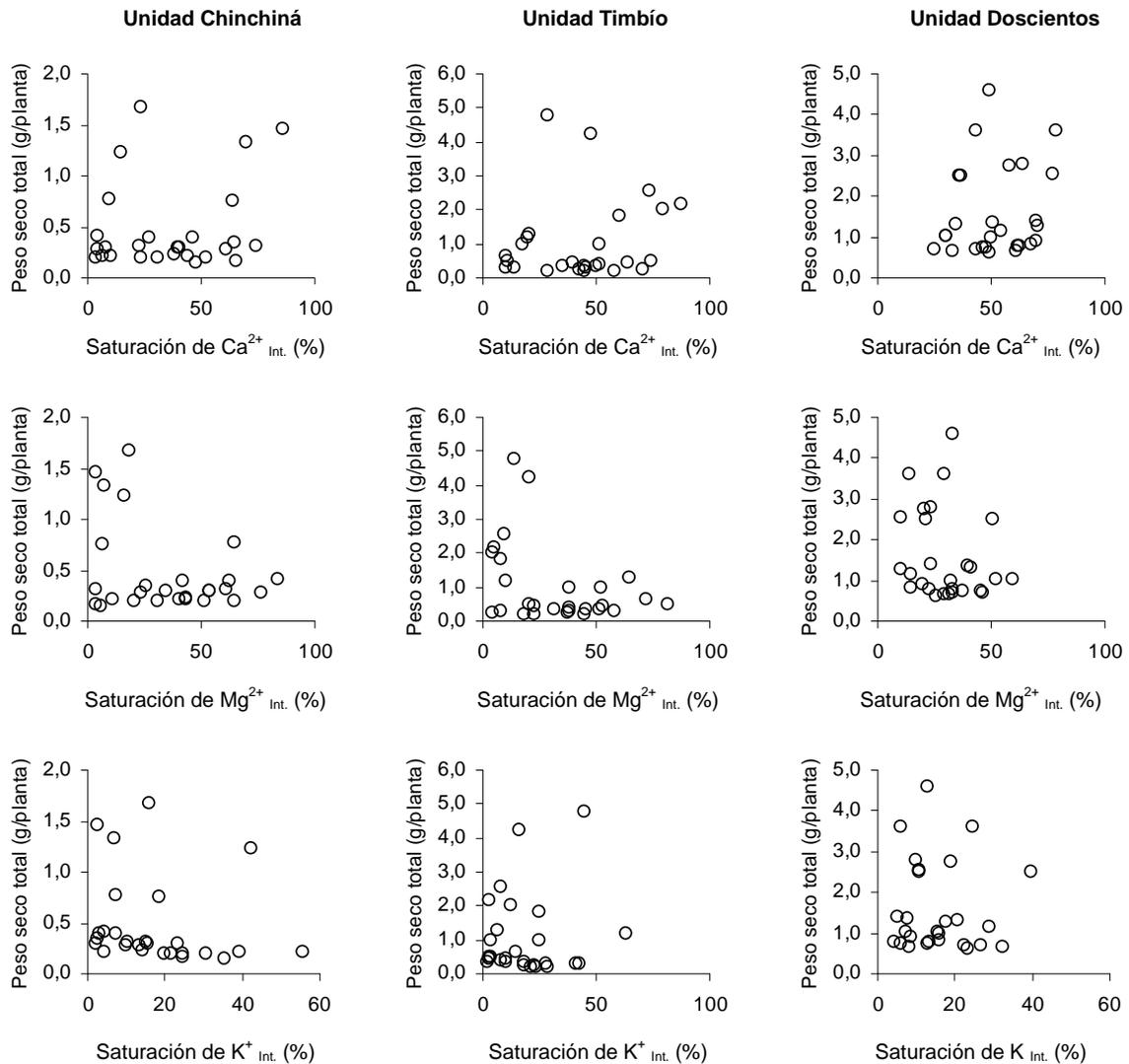


Figura 3–70. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a los porcentajes de saturación de las bases intercambiables.

En contraposición a lo obtenido para la fase intercambiable, se encontró efecto de algunas de las relaciones de actividades sobre el peso seco; más específicamente las relaciones Ca/Mg y Ca/K

(Figura 3–71). Al aumentar la proporción de los iones libres de Ca^{2+} en la solución del suelo frente al Mg^{2+} o K^+ , el crecimiento de las plantas fue mayor; tendencia que fue más estrecha para los cocientes Ca/Mg en la unidad Doscientos ($R^2=0,57$) y Ca/K en Chinchiná ($R^2=0,45$). Esta respuesta, como se ha venido debatiendo, se debe tanto a la competencia de Mg^{2+} y K^+ , en consecuencia de sus altas actividades en la solución del suelo, como a la precipitación de Ca^{2+} con los aniones presentes, y el incremento de la salinidad que acompaña los aumentos de las concentraciones de Mg^{2+} y K^+ . Debido al comportamiento lineal presentado, no será posible definir un valor óptimo para estas relaciones, más aun cuando se sabe que para las tres unidades de suelos el mayor peso se logró prácticamente con el tratamiento testigo.

De acuerdo a lo expuesto, se acepta entonces la hipótesis planteada acerca del efecto de los cambios en las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la solución del suelo sobre el crecimiento de café en estas etapa.

Lo anterior corrobora de nuevo que para el Ca^{2+} la actividad de los iones en la solución fue un mejor indicador que la fase “intercambiable”, y justifica el monitoreo simultáneo en las dos fases, como lo sugiere Barber (1995) para detectar problemas que se pueden presentar en el diagnóstico de la fertilidad del suelo. Henao et al. (1995) también confirman que para el cultivo de café las relaciones de las actividades Mg^{2+} y K^+ llegan a expresar mejor el comportamiento de las plantas. Resultados similares han sido registrados por Taira et al. (2004) para otras especies en torno a las relaciones Mg:K y Ca:Mg. Estos autores pudieron predecir con mayor certeza el crecimiento de las plantas en función de las variables citadas en la solución del suelo con respecto a la fracción intercambiable.

Ding et al. (2006), pudieron demostrar que en experimentos conducidos en torno a la competencia entre los cationes, tenía más sentido si las relaciones se agrupaban de acuerdo con las concentraciones de los nutrientes utilizadas en el estudio. Cuando los datos de la relación de Mg/K fueron agrupados según las dosis de K, se logró separar el efecto de cada una (Figura 3–72). Dada la alta correlación entre los contenidos intercambiables y las actividades para los dos elementos, las tendencias registradas fueron similares en las dos fases, sin que hubiera diferencias marcadas entre las unidades de suelo. Mediante este procedimiento se logró que los datos se agruparan de manera clara en conformidad a las cantidades de K suministradas, resultado que se reflejó en tendencias más evidentes y con una menor variabilidad. Para las tres dosis de K el peso de las plantas tendió a reducirse con el aumento de la relación Mg/K, siendo más notorio el comportamiento para el tratamiento sin K, seguido por la dosis baja (1 g dm^{-3}); sin embargo, se registraron valores bajos de la biomasa tanto para relaciones estrechas como amplias; en es mismo sentido, para razones bajas entre Mg^{2+} y K^+ , fue posible encontrar un rango amplio del peso de las planta, en tanto que para relaciones muy altas sólo se lograron valores bajos de biomasa seca.

En un análisis desprevenido del problema es posible atribuir las anteriores tendencias a la competencia entre Mg^{2+} y K^+ , no obstante, y basándose en los antecedentes del caso, se puede aseverar que esta afirmación no es de todo cierto, dado el efecto salino de las fuentes ya discutido. De nuevo se hace necesario entonces aclarar que en el proceso de la evaluación de la fertilidad del suelo mediante este tipo de indicadores, es pertinente “cruzar” toda la información, y recordar que una misma relación se puede lograr con diferentes cantidades, y que estas dependen la fuente.

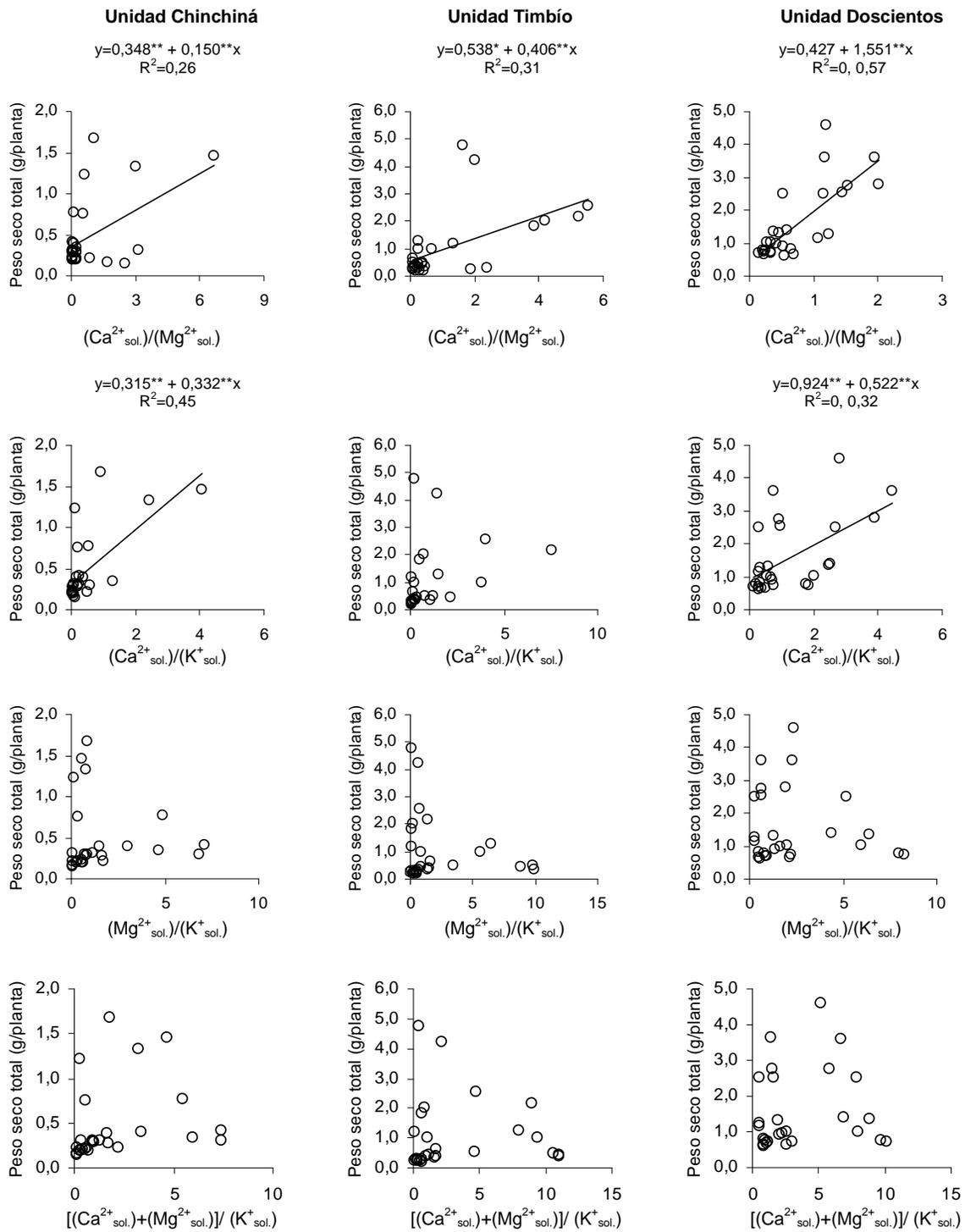


Figura 3–71. Peso seco total de las plantas de café en respuesta a las relaciones de actividades de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la solución del suelo.

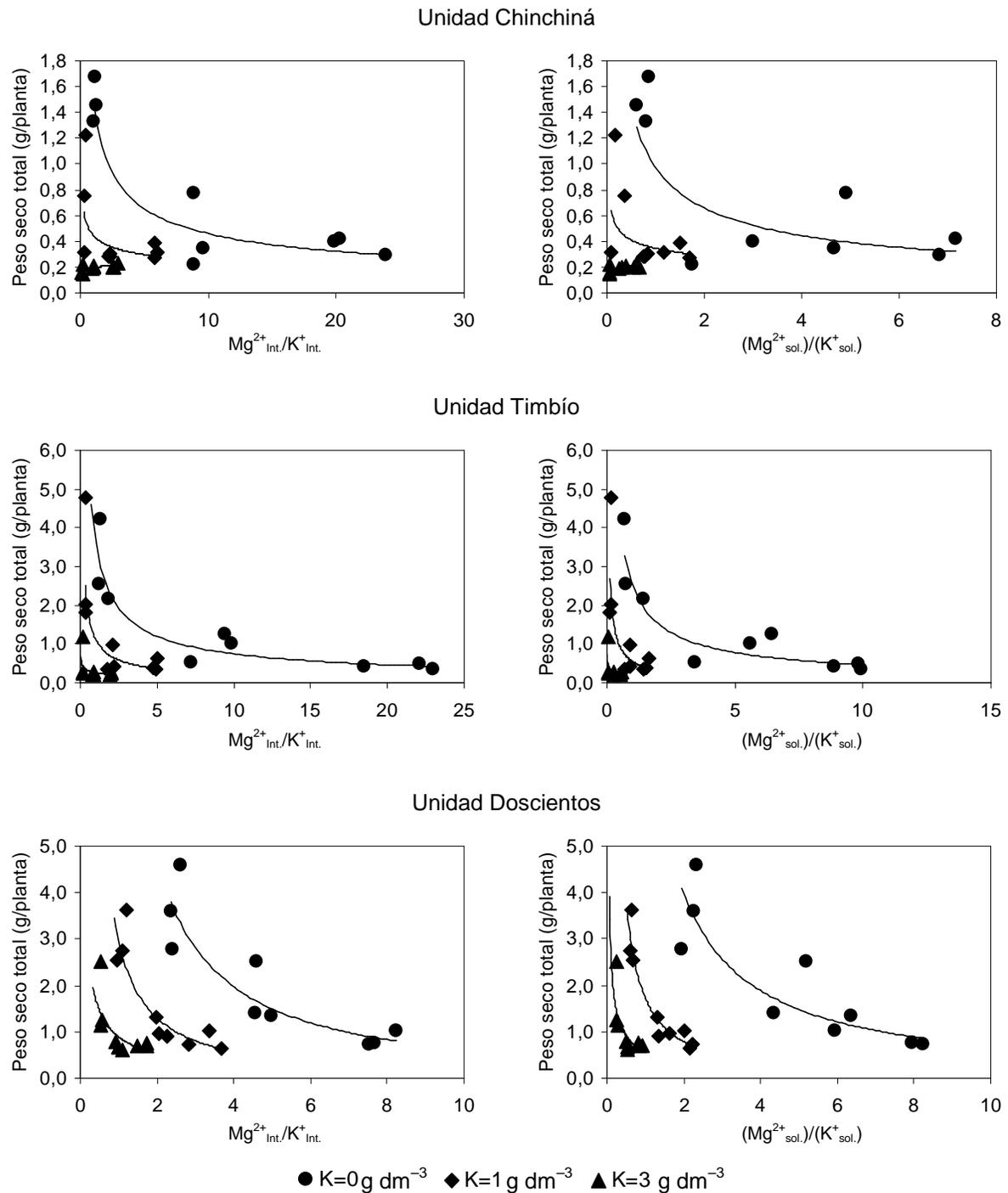


Figura 3-72. Peso seco total de las plantas de café en función de las relaciones Mg/K en la fase intercambiable y en la solución (actividades), agrupadas por las dosis de K.

3.2.5.4 Concentración de Ca, Mg y K en la planta de café en respuesta a las relaciones entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo

Antes de abordar este capítulo es pertinente aclarar que en diversas oportunidades las relaciones entre las bases intercambiables llegan a explicar mejor el comportamiento de su absorción por parte de las plantas; sin embargo, esto no implica necesariamente la ocurrencia de los procesos de antagonismo o sinergismo entre los elementos. Para afirmar que existe competencia entre dos nutrientes debe haber reducción en la absorción de uno de ellos al incrementar el contenido del otro, pues en muchas ocasiones el suministro de un elemento se traduce en aumentos de sus contenidos en la planta, y por consiguiente en incrementos de su relación con respecto a otro, sin que la concentración de este último se haya reducida en respuesta a una competencia (Marschner, 1986; Mengel y Kirkby, 2000).

En la unidad Doscientos las variaciones de la concentración de Ca en las raíces fueron explicadas principalmente por los contenidos de Mg^{2+} , bien sea en la fase de cambio o en la solución (Figura 3–73). Los incrementos de Mg^{2+} se vieron reflejados en una menor absorción de Ca^{2+} por la planta, comportamiento que no se detectó tan claramente para K^+ ; razón por la cual se atribuye el resultado obtenido a la competencia directa de Mg^{2+} antes que la precipitación de Ca^{2+} por los iones sulfato que acompañaban a las fuentes aplicadas. Como una consecuencia de lo anterior, la concentración de Ca en las raíces varió directamente con los cambios de la relación Ca/Mg en términos de sus actividades; respuesta que no fue tan evidente para el mismo cociente de la fase intercambiable, dado que el Ca^{2+} de cambio no fue un buen indicador de su absorción. Dada la relación lineal Ca/Mg, no es posible determinar un nivel óptimo o crítico.

Ahora bien, si se expresa la concentración de Ca de las raíces, tallos y hojas en función de la suma de Mg^{2+} y K^+ intercambiables, se obtienen mayores ajustes (Figura 3–74). Esta respuesta se puede deber tanto al efecto de la competencia conjugada de Mg^{2+} y K^+ , como a la precipitación de Ca^{2+} por los sulfatos que acompañaban a estos dos elementos.

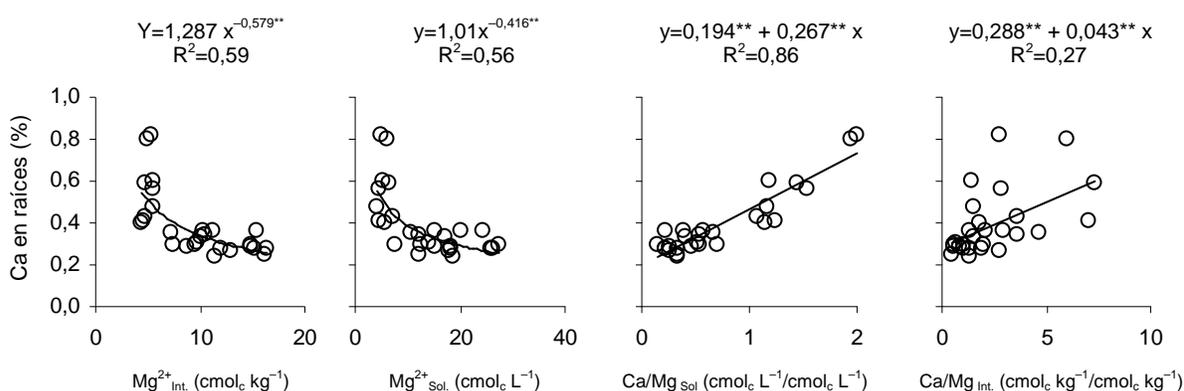


Figura 3–73. Concentración de Ca en raíces de café para la unidad Doscientos, en función de Mg y la relación Ca/Mg en la fase intercambiable (Int.) y su actividad en solución (Sol.).

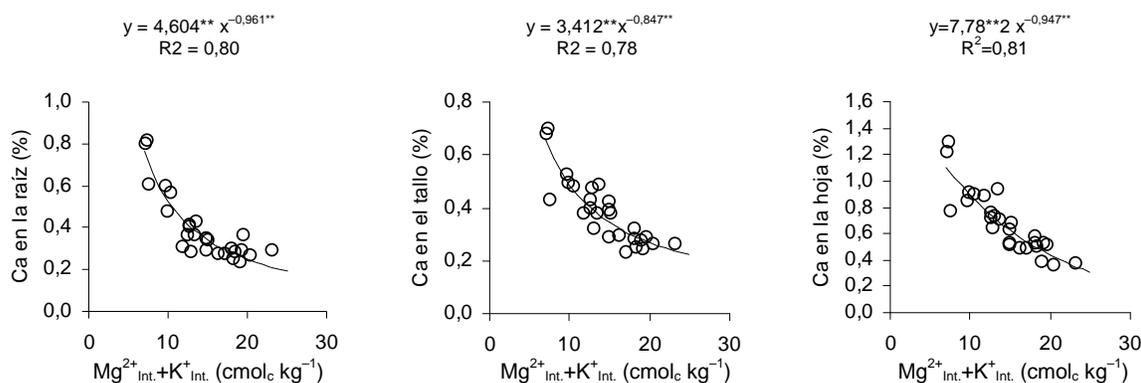


Figura 3–74. Concentración de Ca en las raíces, tallos y hojas de café en respuesta a la suma de los contenidos de Mg²⁺ y K⁺ intercambiables en la unidad Doscientos.

En la Tabla 3–28 se consignan los modelos que mejor explicaron las variaciones de las concentraciones de Ca, Mg y K en las plantas desarrolladas en el suelo de la unidad Doscientos, en respuesta a las relaciones entre estos. El incremento del Mg²⁺ en el suelo, bien sea en el complejo de cambio o en la solución, también disminuyó la concentración de Ca en los tallos y en las hojas, siendo más ajustados los modelos hallados por los tallos. En ambos caso, cuando se expresó la variable de respuesta en términos de las relaciones de las actividades de Ca/Mg, el coeficiente de regresión fue más alto. Las concentraciones de Mg o de K en las diferentes partes de la planta no disminuyeron por los aumentos de los demás elementos; sin embargo, los modelos obtenidos pudieron explicar las variaciones de estas en función de su relación con los otros cationes. Para el caso de Mg la expresión con el mayor ajuste fue encontrado para la concentración foliar, mediante la relación de las actividades (Ca+K)/Mg con un R²=0,83, y para el caso de K, a través de la relación de Mg/K (R²=0,90).

Para la unidad Chinchiná no se detectó efecto competitivo entre los elementos evaluados (Tabla 3–29); sólo se encontró una correlación negativa entre la concentración de Ca en los tallos y el Mg²⁺ intercambiable, sin que el ajuste fuese alto (R²=0,44). Las variaciones de Ca en la planta pudieron ser explicadas a través de las diferentes relaciones de este elemento con Mg²⁺ y K⁺ en las dos fases del suelo; este mismo resultado fue obtenido para las concentraciones de Mg y K en los diferentes órganos de la planta.

En cuanto a la unidad Timbío se refiere, los incrementos en los contenidos de Mg²⁺, tanto en la fase intercambiable como en la solución, afectaron negativamente la absorción de Ca²⁺ y K⁺ por las plantas, resultado que se reflejó en menores concentraciones de estos dos elementos en los diferentes órganos analizados (Tabla 3–30). Así mismo, a medida en que aumentaron los contenidos de K⁺ en el suelo, disminuyó la toma de Ca²⁺. Con base en lo expuesto se puede afirmar que en esta unidad se presentó competencia de Mg²⁺ y K⁺ con respecto a Ca²⁺, y de Mg²⁺ frente a K⁺.

Como se observa en la Tabla 3–30, una de las ecuaciones con mejor ajuste es la que explica los cambios de la concentración de Ca foliar en función de la suma de las actividades de Mg²⁺ y K⁺ (R²=0,88). Este resultado, como se expuso para la unidad Doscientos, se puede relacionar tanto al efecto de la competencia conjugada de Mg²⁺ y K⁺, como a la precipitación de Ca²⁺ por los sulfatos que acompañaban a estos dos elementos. Las variaciones foliares de K fueron explicadas por la

relación de las actividades de Mg/K con un $R^2=0,76$; sin embargo, cuando se introdujo al Ca^{2+} en la ecuación de regresión, el ajuste aumentó ($R^2=0,85$), corroborando así la posibilidad de emplear modelos que describan de una manera más ajustada el comportamiento de la absorción de las bases a través de sus relaciones, sin que esto implique en todos los casos antagonismo entre los cationes.

Con base en lo anterior se acepta la hipótesis planteada en torno al efecto de los cambios en las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase intercambiable y en la solución del suelo sobre la nutrición de café en la etapa de almácigo, expresado en términos de la absorción de estos elementos. Ahora bien, en el ámbito general también se puede afirmar que el efecto de las relaciones evaluadas sobre la absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ fue parcialmente diferente en los tres suelos objeto de estudio; sin embargo, no es posible atribuir las diferencias registradas a la selectividad catiónica, dadas las condiciones particulares que se generaron durante la investigación; en especial el exceso en las dosis aplicadas.

Tabla 3–28. Modelos que explican para el suelo de la unidad Doscientos las variaciones de la concentración de Ca, Mg y K en las diferentes partes de la planta en función de sus contenidos y relaciones en el suelo.

Modelo	R^2
Ca en tallos (%) = 1,283 (Mg int.) ^{-0,578**}	0,74
Ca en tallos (%) = 0,974 (act. Mg) ^{-0,401**}	0,65
Ca en tallos (%) = 0,226** + 0,214** (act. Ca/act. Mg)	0,88
Ca en tallos (%) = 0,286** + 0,040** (Ca int./Mg int.)	0,39
Ca en hojas (%) = 1,798 (Mg int.) ^{-0,474**}	0,42
Ca en hojas (%) = 0,345 (act. Mg) ^{-1,490**}	0,40
Ca en hojas (%) = 0,423** + 0,349** (act. Ca/act. Mg)	0,65
Mg en raíces (%) = 0,469** + 0,080** / (act. Ca/act. Mg)	0,73
Mg en raíces = 0,555** (Mg int./K int.) ^{-0,186**}	0,48
Mg en tallos = 0,527** [(act. Ca + act. K)/act. Mg] ^{-0,286**}	0,71
Mg en tallos = 0,398** (act. Mg/act. K) ^{0,566**}	0,57
Mg en hojas = 0,97** + 339** (Mg int./K int.)	0,59
Mg en hojas = 0,662** [(act. Ca + act. K)/act. Mg] ^{-0,548**}	0,83
K en raíces = 2,864** (Mg int./K int.) ^{-0,173**}	0,65
K en raíces = 2,646** (act. Mg./act. K) ^{-0,134**}	0,67
K en hojas = 2,548** (Mg int./K int.) ^{-0,364**}	0,84
K en hojas = 1,846** (act. Ca/act. K) ^{-0,255**}	0,62
K en hojas = 2,154** (act. Mg/act. K) ^{-0,286**}	0,90

Las concentraciones de los elementos en la planta están dadas en porcentaje, las actividades (act.) en $cmol_c L^{-1}$ y los contenidos intercambiables en $cmol_c kg^{-1}$.

** significativo a 1% de probabilidad, según la prueba Tukey.

Tabla 3–29. Modelos que explican para el suelo de la unidad Chinchiná las variaciones de la concentración de Ca, Mg y K en las diferentes partes de la planta en función de sus contenidos y relaciones en el suelo.

Modelo	R ²
Ca en raíces (%) = 0,176** + 0,117** (act. Ca/act. Mg)	0,69
Ca en raíces (%) = 0,186** + 0,186** (act. Ca/act. K)	0,62
Ca en tallos (%) = 0,384** (act. Ca/act. Mg) ^{0,216**}	0,65
Ca en tallos (%) = 0,286** (Ca int./Mg int.) ^{0,207**}	0,87
Ca en tallos (%) = 0,429** – 0,007** Mg int.	0,44
Ca en hojas (%) = 0,325** + 0,112** (act. Ca/act. Mg)	0,52
Ca en hojas (%) = 0,315** + 0,218** (act. Ca/act. K)	0,70
Mg en raíces (%) = 0,480** (Mg int./K int.) ^{0,204**}	0,69
Mg en raíces (%) = 0,423** + 0,223** (act. Ca/act. Mg)	0,59
Mg en raíces (%) = 0,621** + 0,232** (act. Mg/act. K)	0,59
Mg en tallos (%) = 0,334** (Mg int./K int.) ^{0,310**}	0,73
Mg en tallos (%) = 0,275** (act. Ca/act. Mg) ^{-0,313**}	0,74
Mg en tallos (%) = 0,462** (act. Ca/act. Mg) ^{0,280**}	0,54
Mg en hojas (%) = 0,263** (act. Ca/act. Mg) ^{-0,450**}	0,67
Mg en hoja (%) = 0,341** (Mg int./K int.) ^{-0,465**}	0,74
K en raíces (%) = 2,616** (Mg int./K int.) ^{-0,121**}	0,54
K en tallo (%) = 2,171** (Ca int. + Mg int./K int.) ^{-0,151**}	0,49
K en tallo (%) = 1,583** (act. Mg/act. K) ^{-0,133**}	0,53
K en tallo (%) = 1,679** (Ca int. + Mg int./K int.) ^{-0,154**}	0,54
K en hoja (%) = 3,193** (Mg int./K int.) ^{-0,283**}	0,70
K en hoja (%) = 2,317** (act. Mg/act. K) ^{-0,316**}	0,79
K en hoja (%) = 2,660** (act. Ca + act. Mg/act. K) ^{-0,364**}	0,80

Las concentraciones de los elementos en la planta están dadas en porcentaje, las actividades (act.) en $\text{cmol}_c \text{L}^{-1}$ y los contenidos intercambiables en $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

** significativo a 1% de probabilidad, según la prueba Tukey.

Tabla 3–30. Modelos que explican para el suelo de la unidad Timbío las variaciones de la concentración de Ca, Mg y K en las diferentes partes de la planta en función de sus contenidos y relaciones en el suelo.

Modelo	R ²
Ca en raíces (%) = 0,214** + 0,109** (act. Ca/act. Mg)	0,63
Ca en raíces (%) = 0,247** + 0,097** (act. Ca/act. K)	0,53
Ca en raíces (%) = 1,653** (act. Mg + act. K) ^{-0,503**}	0,60
Ca en raíces (%) = 0,549** [(act. Mg + act. K)/act. Ca] ^{-0,333**}	0,63
Ca en tallos (%) = 0,695** (Mg int.) ^{-0,334**}	0,61
Ca en tallos (%) = 0,768** (act. Mg) ^{-0,343**}	0,54
Ca en tallos (%) = 0,260** + 0,037** (Ca int./Mg int.)	0,68
Ca en tallos (%) = 0,271** + 0,102** (act. Ca/act. Mg)	0,54
Ca en hojas (%) = 0,635* (K int.) ^{-0,286**}	0,50
Ca en hojas (%) = 0,786** (act. K) ^{-0,240**}	0,54
Ca en hojas (%) = 0,523** (act. Ca/act. K) ^{0,220**}	0,69
Ca en hojas (%) = 2,088** (act. Mg + act. K) ^{-0,472**}	0,88
Ca en hojas (%) = 0,717** [(act. Mg + act. K)/act. Ca] ^{-0,292**}	0,80
Mg en raíces (%) = 0,469** (Mg int./K int.) ^{0,186**}	0,54
Mg en raíces (%) = 0,467* (act. Ca/act. Mg) ^{-0,172**}	0,41
Mg en hojas (%) = 0,465* (Ca int./Mg int.) ^{-0,381**}	0,52
Mg en hojas (%) = 0,298** (Mg int./K int.) ^{0,447**}	0,77
Mg en hojas (%) = 0,590** [(act. Ca + act. K/act. Mg)] ^{-0,499**}	0,85
K en raíces (%) = 3,794** (Mg int.) ^{-0,219**}	0,56
K en raíces (%) = 4,124** (act. Mg) ^{-0,239**}	0,54
K en raíces (%) = 2,709** (Mg int./K int.) ^{-0,180**}	0,68
K en raíces (%) = 3,437** [(Ca int. + Mg int./K int.)] ^{-0,199**}	0,56
K en tallos (%) = 1,986** (Mg int./K int.) ^{-0,155**}	0,66
K en tallos (%) = 2,467** [(Ca int. + Mg int./K int.)] ^{-0,178**}	0,59
K en tallos (%) = 1,724** (act. Mg/act. K) ^{-0,141**}	0,64
K en hojas (%) = 3,321** (Mg int./K int.) ^{-0,276**}	0,66
K en hojas (%) = 5,134** [(Ca int. + Mg int./K int.)] ^{-0,346**}	0,69
K en hojas (%) = 2,570** (act. Mg/act. K) ^{-0,275**}	0,76
K en hojas (%) = 3,073** [(act. Ca + act. Mg/act. K)] ^{-0,328**}	0,85

Las concentraciones de los elementos en la planta están dadas en porcentaje, las actividades (act.) en $\text{cmol}_c \text{L}^{-1}$ y los contenidos intercambiables en $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

*, ** significativo a 5 y 1% de probabilidad, según la prueba Tukey.

Tanto para café (Coelho y Verlengia, 1972) como para otros cultivos (Barber, 1995, Malavolta et al., 1976, citado por Corrêa et al. 2006; Moore et al., 1961; Oliveira, 1993,) se ha evidenciado que el exceso de Ca^{2+} en la fase de cambio o en la solución del suelo afecta negativamente la absorción de Mg^{2+} por las plantas. Este comportamiento no se observó en este estudio, debido a que los contenidos realmente disponibles de Ca^{2+} en los suelos eran bajos con respecto al Mg^{2+} , y por lo tanto no existía una competencia por parte de este elemento. En contraposición a lo anterior, si hubo un exceso de Mg^{2+} frente al Ca^{2+} ; situación que conllevó a afectar de manera negativa la toma de Ca^{2+} por las raíces. Aunque la anterior situación no es muy frecuente, puede ocurrir cuando se realizan prácticas inadecuadas de fertilización que se traducen en un exceso de Mg^{2+} en comparación con el Ca^{2+} , como lo reportan Böll y Nakagawa (1995), Freitas (1998) y Oliveira (1993).

Aunque algunos autores también reportan que la competencia de Mg^{2+} puede afectar la toma de K^+ por la planta (Mc Lean y Carbonell, 1972), normalmente esta condición no ocurre en el cultivo de café, pues en general los planes de fertilización incluyen cuatro a seis veces más K que Mg; no obstante, los resultados encontrados en esta investigación advierten la posibilidad de generar tal situación.

En contraposición a lo expuesto, es más frecuente el antagonismo de K^+ con respecto a Mg^{2+} , tanto en café (Chaves, 2002, Henao et al., 1995; Malavolta, 2006, Sadeghian 2003), como en otros cultivos (Fonseca y Meurer, 1997; Oliveira et al., 2001). Por lo anterior, se hubiera esperado encontrar también un efecto negativo de K^+ sobre el Mg^{2+} en los suelos de las unidades Doscientos y Chinchiná, lo cual no ocurrió.

4. Conclusiones

Las reacciones de intercambio Ca–Mg–K, evaluadas en la primera fase del trabajo, permitieron concluir que:

- De acuerdo a la metodología empleada y los coeficientes de selectividad de Vanselow (K_v), en todos los suelos objetos de estudio hubo una fuerte preferencia por el Ca^{2+} antes que por el Mg^{2+} , y pese a que dicha selectividad disminuyó con el incremento de la fuerza iónica, no dejó de manifestarse. En este sentido, los suelos derivados de cenizas volcánicas presentaron menores cambios en su selectividad por el Ca^{2+} frente al Mg^{2+} con el incremento de la fuerza iónica. Además, la reducción en el pH de los suelos se tradujo en una disminución de la preferencia por el Ca^{2+} , favoreciendo la adsorción del Mg^{2+} .
- En nueve de las 14 unidades de suelo se presentó preferencia por el K^+ y no por el Ca^{2+} , sin que este comportamiento se pudiera relacionar de manera clara con el origen o la mineralogía de las unidades; además, para la mayoría de ellas el aumento de la fuerza iónica no afectó la selectividad catiónica en este intercambio.
- Una vez establecido el equilibrio termodinámico entre la fase intercambiable y la solución, todos los suelos evaluados fueron más selectivos por el K^+ que por el Mg^{2+} , y presentaron diferencias en su comportamiento con los aumentos de la fuerza iónica, sin que se dejara de manifestar la preferencia por el K^+ . En general los Andisoles estudiados no modificaron su comportamiento de la selectividad para este intercambio con las variaciones en la fuerza iónica.

Los resultados obtenidos con la aplicación de las diferentes dosis de Ca, Mg y K en los tres suelos seleccionados para la segunda fase de la investigación permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

- Fue posible modificar los contenidos y las relaciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el suelo; sin embargo, debido a las altas dosis suministradas, se presentó una elevada residualidad, sin que el método de laboratorio permitiera separar la fracción intercambiable de otras formas del elemento presentes en el suelo.
- El exceso de las dosis aplicadas elevó la salinidad y afectó negativamente el crecimiento de las plantas, en especial con el suministro de Mg y K. Esta respuesta se relacionó con los índices de salinidad y solubilidad de las fuentes fertilizantes empleadas.
- La concentración de Ca en las plantas se correlacionó con la actividad de Ca^{2+} en la solución del suelo, más no con su fracción intercambiable. Para el Mg^{2+} , las dos fracciones permitieron predecir sus cambios en la planta. La actividad de K^+ en la solución del suelo y su contenido intercambiable explicaron las variaciones de K en las hojas, pero no en las raíces ni en los tallos.

- En ninguna de las tres unidades de suelo, los cambios en las relaciones Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K en la fase intercambiable lograron explicar las variaciones del peso seco total de las plantas. En contraste, para dos de las unidades de suelo se encontró efecto de las actividades Ca/Mg y Ca/K en la solución del suelo sobre la variable de respuesta, comportamiento que se relacionó tanto con la competencia de Mg^{2+} y K^+ , como la precipitación de Ca^{2+} con los aniones presentes.

A Anexo: Foto microlisímetro

1. Microlisímetros Soil Rhizon Moisture Sampler (Eijkelkamp).



B Anexo: Mineralogía de suelos

1. Información sobre la mineralogía de las unidades de suelos utilizadas en el estudio.

No.	Unidad de suelo	Mineral	Presencia (%)	Abundancia
1	Líbano	Albita	65	++++
		Cordierita	17	++
		Sulfato oxotatanium	11	+
		Cristobalita	4	Tr
		Oxido silicatado tricalcico	3	Tr
2	Chinchiná (P)	Albita	76	++++
		Cordierita	13	+
		cuarzo	11	+
3	Chinchiná (Ch)	Albita	86	++++
		Hornblenda	13	
		Cuarzo	1	Tr
4	Chinchiná (V)	a-Si O ₂ (cuarzo)	61	++++
		Hematita	30	++
		Natrita	5	Tr
		Dolomita	3	Tr
		Magnetita	1	Tr
5	Timbío	Anortita	57	++++
		Albita	26	++
		Indialita	8	+
		Cristobalita	7	+
		Oxido de sodio	2	Tr
6	Fresno	Albita (sodio tecto-aluminosilicato)	55	++++
		Cordierita	35	+++
		Cuarzo	7	+
		Rutilo	2	Tr
		Zeolita (potasio tecto-aluminosilicato)	1	Tr

++++ : Dominante >50%, +++: Abundante 50 – 30%, ++: Común 30 – 15%, +: Presente 15 – 5%, Tr: Trazas <5%

Continuación 1. Información sobre la mineralogía de las unidades de suelos utilizadas en el estudio.

No.	Unidad de suelo	Mineral	Presencia (%)	Abundancia
7	Quindío	Albita	38	+++
		Anfíbol	23	++
		a-Na ₂	17	++
		Aluminosilicato magnesico	11	+
		Cuarzo	10	+
8	San Simón	Anortita	41	+++
		Microclina	22	++
		Albita	21	++
		Hornblenda	9	+
		Cuarzo	6	+
		Cordierita	2	Tr
9	Paujíl	Cuarzo	42	+++
		Microclina	24	++
		Caolinita	16	++
		Gibsitita	9	+
		Metahalloisita	8	+
10	Doscientos (J)	Gibsitita	62	++++
		Caolinita	37	+++
		Vermiculita	1	Tr
11	Doscientos (S)	Albita	70	++++
		Cuarzo	14	+
		Potasio ciclo-trifosfato	10	+
		a-Na ₂	4	Tr
		Indialita	2	Tr
12	Suroeste	Cuarzo	27	++
		Magnetita	25	++
		Oxide silicio	25	++
		crystalita	19	++
		cuarzo	4	Tr
13	Salgar	Cuarzo	76	++++
		Caolinita	15	+
		Oxido de aluminio	6	+
		Magnetita	2	Tr
		Anatasa	1	Tr
14	Guadalupe	Cuarzo	80	++++
		Ortoclasa	13	+
		Cloritoide	6	+
		Cristobalita	1	Tr

C. Anexo: Análisis de varianza

1. Análisis de varianza para en el intercambio Ca–Mg.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Concentración	3	0,39285504	0,13095168	222,89	<,0001
Suelo	13	0,36869559	0,02836120	48,27	<,0001
Concentración*Suelo	39	0,05387247	0,00138135	2,35	<,0001

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,892026	13,97457	0,024239	0,173448

2. Análisis de varianza para en el intercambio K–Ca.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Concentración	3	6,32846276	2,10948759	5,40	0,0014
Suelo	13	76,47944923	5,88303456	15,05	<,0001
Concentración*Suelo	39	44,12888415	1,13150985	2,90	<,0001

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,659097	64,97306	0,625143	0,962158

3. Análisis de varianza para en el intercambio K–Mg.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Concentración	3	0,70832627	0,23610876	25,16	<,0001
Suelo	13	1,38523089	0,10655622	11,36	<,0001
Concentración*Suelo	39	0,92288758	0,02366378	2,52	<,0001

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,656771	64,66734	0,096868	0,149794

4. Análisis de varianza para en el peso seco total en la unidad Chinchiná.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	1,78431974	0,89215987	4,67	0,0102
Mg	2	15,02400375	7,51200188	39,34	<,0001
K	2	14,77668048	7,38834024	38,69	<,0001
Ca*Mg	4	1,41429366	0,35357342	1,85	0,1197
Ca*K	4	0,98362459	0,24590615	1,29	0,2754
Mg*K	4	12,48284851	3,12071213	16,34	<,0001
Ca*Mg*K	8	2,50820611	0,31352576	1,64	0,1136

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,513469	92,35395	0,436996	0,473176

5. Análisis de varianza para en el peso seco de raíces en la unidad Chinchiná.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	0,03451446	0,01725723	1,73	0,1789
Mg	2	0,65131022	0,32565511	32,71	<,0001
K	2	0,69550553	0,34775276	34,92	<,0001
Ca*Mg	4	0,02980927	0,00745232	0,75	0,5599
Ca*K	4	0,06084713	0,01521178	1,53	0,1947
Mg*K	4	0,61065378	0,15266344	15,33	<,0001
Ca*Mg*K	8	0,13687253	0,01710907	1,72	0,0947

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,478436	78,55040	0,099785	0,127034

6. Análisis de varianza para en el peso seco de tallos en la unidad Chinchiná.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	0,01682342	0,00841171	1,33	0,2670
Mg	2	0,40321697	0,20160848	31,82	<,0001
K	2	0,36252248	0,18126124	28,61	<,0001
Ca*Mg	4	0,02088210	0,00522053	0,82	0,5110
Ca*K	4	0,03037771	0,00759443	1,20	0,3120
Mg*K	4	0,29005573	0,07251393	11,45	<,0001
Ca*Mg*K	8	0,07502238	0,00937780	1,48	0,1649

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,437793	75,38200	0,079598	0,105593

7. Análisis de varianza para en el peso seco de hojas en la unidad Chinchiná.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	1,06451806	0,53225903	6,86	0,0013
Mg	2	6,04979159	3,02489580	38,98	<,0001
K	2	5,81489876	2,90744938	37,47	<,0001
Ca*Mg	4	0,79917197	0,19979299	2,57	0,0383
Ca*K	4	0,39830160	0,09957540	1,28	0,2772
Mg*K	4	4,93091147	1,23272787	15,89	<,0001
Ca*Mg*K	8	0,94184255	0,11773032	1,52	0,1517

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,514694	115,8073	0,278573	0,240549

8. Análisis de varianza para en el peso seco total en la unidad Timbío.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	38,5976622	19,2988311	38,42	<,0001
Mg	2	167,4896811	83,7448405	166,74	<,0001
K	2	63,8791969	31,9395985	63,59	<,0001
Ca*Mg	4	35,7859587	8,9464897	17,81	<,0001
Ca*K	4	9,0782013	2,2695503	4,52	0,0015
Mg*K	4	55,2135342	13,8033835	27,48	<,0001
Ca*Mg*K	8	6,0964291	0,7620536	1,52	0,1517

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,755018	68,81343	0,708696	1,029880

9. Análisis de varianza para en el peso seco de raíces en la unidad Timbío.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	1,84968522	0,92484261	30,11	<,0001
Mg	2	9,02972576	4,51486288	146,98	<,0001
K	2	3,50431700	1,75215850	57,04	<,0001
Ca*Mg	4	2,34362887	0,58590722	19,07	<,0001
Ca*K	4	0,56534130	0,14133533	4,60	0,0013
Mg*K	4	3,10967997	0,77741999	25,31	<,0001
Ca*Mg*K	8	0,51385225	0,06423153	2,09	0,0373

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,736996	64,78230	0,175262	0,270539

10. Análisis de varianza para en el peso seco de tallos en la unidad Timbío.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	0,91380363	0,45690181	35,99	<,0001
Mg	2	3,35690379	1,67845189	132,21	<,0001
K	2	1,32003720	0,66001860	51,99	<,0001
Ca*Mg	4	0,96578854	0,24144714	19,02	<,0001
Ca*K	4	0,34668169	0,08667042	6,83	<,0001
Mg*K	4	1,21813863	0,30453466	23,99	<,0001
Ca*Mg*K	8	0,27368056	0,03421007	2,69	0,0074

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,731268	62,20306	0,112676	0,181141

11. Análisis de varianza para en el peso seco de hojas en la unidad Timbío.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	15,18816261	7,59408131	39,42	<,0001
Mg	2	65,68968854	32,84484427	170,48	<,0001
K	2	24,73927901	12,36963950	64,20	<,0001
Ca*Mg	4	12,06227832	3,01556958	15,65	<,0001
Ca*K	4	2,81931014	0,70482754	3,66	0,0065
Mg*K	4	20,85455043	5,21363761	27,06	<,0001
Ca*Mg*K	8	1,56596380	0,19574547	1,02	0,4244

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,753253	75,91358	0,438932	0,578200

12. Análisis de varianza para en el peso seco total en la unidad Doscientos.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	24,7389662	12,3694831	22,10	<,0001
Mg	2	195,7242022	97,8621011	174,84	<,0001
K	2	51,0219726	25,5109863	45,58	<,0001
Ca*Mg	4	12,2461044	3,0615261	5,47	0,0003
Ca*K	4	4,3073967	1,0768492	1,92	0,1071
Mg*K	4	29,3656545	7,3414136	13,12	<,0001
Ca*Mg*K	8	4,6288470	0,5786059	1,03	0,4111

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,703058	47,69048	0,748148	1,568759

13. Análisis de varianza para en el peso seco de raíces en la unidad Doscientos.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	2,04711691	1,02355845	16,28	<,0001
Mg	2	18,71400902	9,35700451	148,79	<,0001
K	2	4,83648035	2,41824018	38,45	<,0001
Ca*Mg	4	0,98064214	0,24516054	3,90	0,0044
Ca*K	4	0,41187248	0,10296812	1,64	0,1655
Mg*K	4	2,81284203	0,70321051	11,18	<,0001
Ca*Mg*K	8	0,49008062	0,06126008	0,97	0,4568

Raíz cuadrada	C.V. (%)	RAÍZ C.M.E.	Promedio
0,664695	55,14885	0,250771	0,454717

14. Análisis de varianza para en el peso seco de tallos en la unidad Doscientos.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	0,74735098	0,37367549	28,22	<,0001
Mg	2	4,69292902	2,34646451	177,21	<,0001
K	2	1,22803311	0,61401656	46,37	<,0001
Ca*Mg	4	0,61601769	0,15400442	11,63	<,0001
Ca*K	4	0,15266187	0,03816547	2,88	0,0233
Mg*K	4	0,84383343	0,21095836	15,93	<,0001
Ca*Mg*K	8	0,11700027	0,01462503	1,10	0,3607

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,722988	48,47478	0,115071	0,237382

15. Análisis de varianza para en el peso seco de hojas en la unidad Doscientos.

Fuente	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Pr>F
Ca	2	7,32198956	3,66099478	22,19	<,0001
Mg	2	56,22453694	28,11226847	170,40	<,0001
K	2	14,71259034	7,35629517	44,59	<,0001
Ca*Mg	4	3,06535874	0,76633969	4,65	0,0012
Ca*K	4	1,12543021	0,28135755	1,71	0,1494
Mg*K	4	8,12575543	2,03143886	12,31	<,0001
Ca*Mg*K	8	1,66050546	0,20756318	1,26	0,2662

Raíz cuadrada	C.V. (%)	Raíz C.M.E.	Promedio
0,697040	46,33194	0,406173	0,876660

Bibliografía

AGBENIN J. O.; YAKUBU S. 2006. Potassium–calcium and potassium–magnesium exchange equilibria in an acid savanna soil from northern Nigeria. *Geoderma* 136: 542–554.

ALEMÁN, F.; NIEVES-C., M.; MARTINEZ, V.; RUBIO, F. 2009. Potassium/sodium steady- state homeostasis in *Thellungiella halophila* and *Arabidopsis thaliana* under long-term salinity conditions. *Plant Science*, 176: 768–774.

ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W.S. D. 2009. Electroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO V.F.; ALLEONI L.R.F., Ed. Química e mineralogía do solo. Parte II – Aplicações. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 69–129.

AMÉZQUITA C., E. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. 2001. *In: Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento*, Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo. Comité Regional del valle del Cauca. p. 11–30.

ANDRIST–RANGEL Y, SIMONSSON M., ANDERSSON S., OBORN I., HILLIER S. 2006. Mineralogical budgeting of K in soil: a basis for understanding standard measures of reserve K. *J. Plant Nutrition Soil Science* 169:605–615.

ARIAS S., E. 2008. Efecto de la textura del suelo sobre las pérdidas por lixiviación de nitrógeno, fósforo y potasio, aplicados en la fertilización. *Manizales (Colombia)*, Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 96 p.

AVILA R., W. E.; SADEGHIAN K., S.; SANCHEZ A., P. M.; CASTRO F., H. E. Producción de almácigos de café en el departamento de Santander con diferentes fuentes de materia orgánica y de fósforo. *Avances Técnicos Cenicafé (Colombia) No. 356:1–12*. 2007.

BARAK, P. 1990. SPECIES: A spreadsheet program for modeling speciation of soil solution. *J. Agron. Educ.* 19:44–46. (<http://www.soils.wisc.edu/about.barak/species.htm>).

BARBER, S.A. 1995. *Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach*. John Wiley y Sons. New York. 414 p.

BATJES N. H. 1995. A homogenized soil data file for global environmental research: A subset of FAO, ISRIC and NRCS profiles (Version 1,0). *Work. Pap. 95/10b*, ISRIC, Wageningen.

BEAR, F. E.; TOTH, S.J. 1948. Influence of Ca on availability of other soil cations. *Soil Sci.*, 65:69–75.

BERTSCH, F.; ENRÍQUEZ, C.; CABALCETA, G. 1991. Respuesta del café a las modificaciones de los cationes en el suelo en dos zonas cafetaleras de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*: 15(1/2):113–121.

BOHN, H. L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR, G. A. 2001. Soil Chemistry. Tercera edición. John Wiley & Sons, INC, New York. 307 p.

BÖLL L, T.; NAKAGAWA, J. 1995. Desenvolvimento, produção de bulbos e absorção de nutrientes na cultura do alho vernalizado em função de relações cálcio:magnesio no solo. R. Bars. Ci. Solo, Campinas; 19:409–415.

BRAVO G., E. 1978. Fertilización potásica en café. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 9(2):68–75.

CADENA R. M. E. 1997. Absorción y translocación del magnesio en presencia del potasio y del Ca en plantas de café (*Coffea arabica* L.) variedad Colombia. Tesis: Magister of Science. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 221 p.

CADENA R. M. E. Relación del magnesio con el potasio y el Ca en la interfase: suelo derivado de cenizas volcánicas – raíces de plantas de café. 2004. Tesis: Doctor en suelos. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Posgrado en Suelos y Aguas. Palmira, Valle. 273 p.

CARRILLO P., I. F. Manual de laboratorio de suelos. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1985. 111 p.

CARRILLO P. I. F. 1990. El servicio de análisis de suelos y la fertilización racional de los cafetales. Chinchiná. Cenicafé. Avances Técnicos. No. 147: 1–4.

CARRILLO P., I. F.; MEJÍA M., B.; FRANCO A., H. F. 1994. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná, Cenicafé. 52 p.

CARVAJAL, J. F. 1984. Cafeto–Cultivo y fertilización. Segunda edición. Instituto Internacional de la Potasa. Berna–Suiza. 254 p.

CASAGRANDE, J. C.; SOARES M. R. 2009. Modelos químicos de adsorção. In: MELO V.F.; ALLEONI L. R. F., Ed. Química e mineralogia do solo. Parte II – Aplicações. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 131–160.

CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R.; MOUTA, E. R. 2008. Zinc adsorption in highly weathered soils. Pesq. agropec. bras., Brasília, 43 (1): 131–139.

CHAVES, J. C. D. 2002. Manejo do solo. Adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira. Londrina, Instituto Agrônômico do Paraná. 36 p. (Circular No 120).

CIOTTA M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. 2003. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo con argila de actividade baixa sob plantio direto. Ci. Rural, 33:1161–1164.

COELHO, F. S.; VERLENGIA, F. 1972. Fertilidade do solo. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 384 p.

COFFEE RESEARCH FOUNDATION – CRF. RUIRU. KENYA. 1990. Standard recommendation for fertilizers, 1990. Kenya Coffee (Kenya) 55(642):817–823. (Technical Circular No. 59).

- CORRÊA J. B.; REIS T. H. P.; POZZA A. A. A. Guimarães P.T.G.; Carvalho J.G. 2007. Índice de saturação por bases na nutrição e na produtividade de cafeeiros catuaí vermelho (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*, Lavras, 2(2):159-167.
- DAHLGREN, R.; SHOJI, S.; NANZYU. M. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In: SHOJI, S.; NANZYU. M.; DAHLGREN, R. (Ed.) *Volcanic ash soils genesis, properties and utilization*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. p. 105–143.
- DEFELIPO B, V.; BRAGA J. M. 1983. Influencia da calagem e fontes de potássio na adsorção de potássio em latossolos em Minas Gerais. *Revi. Bras. Ci. Solo*. 7:119–122.
- DIAZ M., C. 2006. Efecto del encalamiento sobre el crecimiento de las plantas de café en la etapa de almácigo. Tesis: Ingeniera Agrónoma. Manizales (Colombia), Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- DING, Y., LUO, W.; XU, G. 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Ann. Appl. Biol*. 149:111–123.
- ESSINGTON, M. E. 2003. *Soil and water chemistry; an integrative approach*. CRC Press. Boca Raton. 534 p.
- ESTRADA E., G. 1990. Elementos secundarios: calcio, magnesio, azufre. Fundamentos e interpretación de análisis químico. In: Silva M., F. Ed. *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Tercera edición. Bogotá. p 197–214.
- ESTRADA E., G. 2001. Disponibilidad de calcio, magnesio y azufre, su análisis en suelos y plantas y su interpretación. Bogotá. In: Silva M., F. Ed. *Los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la agricultura*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá. p 85–104.
- FARIA, F. E. S.; Lima, L.A.; Rebeiro, M.S.; Rezende F.C.; Carvalho J.G. 2009. Efeito de parcelamento da fertirrigação com N e K e salinidade do solo no crescimento inicial de cultivares de cafeeiro. *Irriga, Botucatu, SP*, 14 (2), 145–157.
- FEIGENBAUM, S., BARTAL, A., PORTNOY, R., SPARKS, D. L., 1991. Binary and ternary exchange of potassium on calcareous montmorillonitic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 49–56.
- FIANTIS, D.; VAN RANST, E.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, I., ZAUZYAH, S. 2002. Effect of calcium silicate and superphosphate application on surface charge properties of volcanic soils from West Sumatra, Indonesia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33(11–12): 1887–1900.
- FIGUEIRÊDO, V. B., FARIA, M. A., SILVA, E. L. 2006. Crescimento inicial do cafeeiro irrigado com água salina e salinização do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 10 (1), 50–57.
- FLETCHER, P., SPOSITO, G., LEVESQUE, C. S., 1984. Sodium–calcium–magnesium exchange reactions on montmorillonitic soil. 1. Binary exchange reactions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 1016–1021.

FONSECA J. A. DA; MEURER E. J. 1997. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. R. Bras. Ci. Solo, Campinas, 21:47–50.

FREITAS, J. A. D. 1998. Determinação da necessidade de calagem para o crescimento inicial do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). Tesis doctorado en suelos y nutrición de plantas. Universidad Federal de Viçosa. 99 p.

GARCÍA O., A. Manejo de la degradación de suelo. 2010. In: Ciencia del suelo. Principios básicos. BURBANO O., H.; SILVA M., F. (Ed). 309 – 356.

GARCIA, A. W. R. 1981. Calagem para o cafeeiro. In: Malavolta, E.; Yamada, T.; Guidolin, T. A. (Eds.). Nutrição e adubação do cafeeiro. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa. p. 103–115.

GILLMAN, G. P.; FOX, R. L. Increases in the cation exchange capacity of variable charge soils following superphosphate applications. Soil Science Society of America Journal 44(5): 934–938. 1980.

GOULDING, K. W. T., 1983. Thermodynamics of potassium exchange in soils and clay minerals. Adv. Agron. 36, 215–264.

GUERRERO R., R. 2001. Fuentes fertilizantes portadoras de elementos secundarios. In: Silva M., F. Los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá. Bogotá. p.105–113.

GUERRERO R., R. 2004. Manual técnico. Propiedades generales de los fertilizantes. Monómeros Colombo–Venezolanos, Barranquilla. 46 p.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. 1999. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6. ed. Upper Saddle River (Estados Unidos), Prentice Hall. 499 p.

HELLING C. S., CHESTERS G., COREY R. B. 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 28: 517–520.

HENAO T., M. C.; DELVAUX, B. 1998. Propiedades de intercambio K–Mg en suelos derivados de materiales volcánicos de la zona cafetera central de Colombia. Cenicafé (Colombia) 49(2):136–150.

HENAO T., M. C.; HERNANDEZ G., E. 2002. Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. Cenicafé (Colombia) 53(4):293–305.

HENAO T., M. C. 2001. Caracterización de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona cafetera central colombiana. In: SUELOS del eje cafetero. Pereira (Colombia), UTP–GTZ. p. 57–77.

HENAO T., M. C.; SUAREZ V., S.; GUERRERO R., R.; ZAPATA H., R. 1995. Evaluación de la disponibilidad del magnesio en dos suelos de la zona cafetera mediante índices relacionados con los factores cantidad e intensidad. *Suelos Ecuatoriales* 25:47–50.

HENAO T., M. C. Dynamique d'éléments fertilisants dans des sols dérivés de cendres volcaniques de la zone caféière centrale de Colombie, sous culture de bananier plantain. Louvain (Belgique), Université Catholique de Louvain, 2002. 239 p.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO–ICA. 1992. Fertilización en diversos cultivos, Quinta aproximación. Manual de Asistencia técnica N° 25. 64 p.

JARVAN, M. 2004. Available plant nutrients in growth substrate depending on various lime materials used for neutralising bog peat. *Agronomy Research*. 2(1):29–37.

JENSEN, H. E., 1973. Potassium calcium exchange equilibria on a montmorillonite and a kaolinitic clay. I. A test on the Argersinger thermodynamic approach. *Agrochimica* 17, 181–190.

Ji. G. L.; LI, H. Y. Electrostatic adsorption of cations. 1997. In: Yu T. R. (Ed.). *Chemistry of Variable Charge Soils*. Oxford University Press, Inc. p. 64–111.

JIMÉNEZ U., F. J. 2005. Dinámica y disponibilidad de potasio en suelos Andisoles e Inceptisoles dedicados al cultivo de la papa en el altiplano cundiboyacense. Tesis Universidad Nacional de Colombia Facultad de Agronomía, Posgrado en Suelos Bogotá, D.C.

KARASAWA, S.; EGUCHI, E. S.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; KARASAWA, M. M. G. 2003. Desenvolvimento de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigadas com água salina. *Engenharia Rural*, v.14, único, 1–12.

KARMARKAR, S. V., DUDLEY, L. M., JURINAK, J. J., JAMES, D. W., 1991. Chloride and perchlorate influence on calcium potassium and magnesium–potassium exchange. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1268–1274.

KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the “Ideal” Soil. 2007. *Soil Science Society of America*. 71:259–26.

LARCHER, W. 2003. *Physiological plant ecology; Ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Fourth edition. Springer. 513 p.

LEÓN S., L.A. 2001. Las propiedades químicas de los suelos y su efecto sobre la disponibilidad de los nutrientes para las plantas. *In: Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento*, Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo. Comité Regional del valle del Cauca.

LEÓN, L. A. 1994. Evaluación de la fertilidad del suelo. *In: Silva M., F. (Ed.). Fertilidad de suelos; diagnóstico y control*. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p. 155–186.

LIEBHARDT, W. C. 1981. The basic cation saturation ratio concept and lime and potassium recommendations on Delaware's Coastal Plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:544–459.

LINDSAY, W. L. 2001. *Cemical equilibria in soils*. Ney Jersey, Blackburn. 449 p.

- LOPERA, W. V.; MARTEL, Y. A.; CESCAS M. P. 1979. Onion response to lime on acid histosols as affected as Ca/Mg ratios. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:1172–1177.
- LOYOLA, E.; PAVAN M. A. 1989. Selectividade de troca de cátions em solos ácidos. *R. Bras. Ci. Solo. Campinas*, 13:131–138.
- MALAVOLTA, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres. 638 p.
- MARSCHNER, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press, London. 889 p.
- Mc BRIDE, M. B. Environmental chemistry of soils. 1994. Oxford University Press. New York Oxford. 406 p.
- Mc LEAN, E. O.; CARBONELL, M. D. 1972. Calcium, Magnesium and potassium saturation in tow soils and their effects upon yield and nutrient contents of German Millet and Alfalfa. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36:927–930.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. 2000. Principios de nutrición vegetal. Traducción al español de la 4ª edición (1987). Internacional Potash Institute. Basel, Switzerland. 692 p.
- MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. 1993. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. *R. Bras. Ci. Solo. Campinas*, 17:377–382.
- MOORE, D. P.; OVERSTREET, R.; JACOBSON, L. 1961. Uptake of magnesium and its relationship with calcium in excised barley roots. *Plant Physiology, Rockville*. 36 (3) 290–295.
- MOREIRA, A.; CARVALHO, J. G. DE; EVANGELISTA, A. R. 2005. Calcium and magnesium ratio in the fertility of a dystrophic dark red latosol cultivated with alfalfa. *Ciencia e Agrotecnologia*. 29(4):786–794.
- MUCHOVEJ, R. M. C.; BORGES, A. C. NOVAIS, R. F.; THIEBAUT, J. T. L. 1986. Effect of liming levels and Ca:Mg ratios on yield, nitrogen content and nodulation of soybeans grown in acid Cerrado soil. *Journal of soil science*. 37: 235–240.
- NAKAHARA, O., WADA, S., 1995. K–Ca exchange equilibria on humic and allophonic Andisols. *Soil Sci. Plant Nutr.* 41, 167–172.
- NAVARRO B., S.; NAVARRO G., G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Ediciones Mundi–Prensa, Madrid. 487 p.
- NAZÁRIO, A. A.; GARCIA, G.O.; GONÇALVES, I.Z.; MADALÃO, J.C.; ARAUJO, G. L. 2010. Crescimento do cafeeiro conilon irrigado com água salina. *Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal*, 7 (3), 178 –195.
- NDAYIRAGIJE S.; DELVAUX B. 2004. Selective sorption of potassium in a weathering sequence of volcanic ash soils from Guadeloupe, French West Indies. *Catena* 56: 185–198.

- NÉMETH, K.; MENGEL, K.; GRIMME H. 1970. The concentration of K, Ca and Mg in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca and Mg. *Soil Sci. Baltimore*, 109(3):179–185.
- NIEVES, C.; MARTINEZ C.; A.; MARTINEZ, F.; RUBIO, F. 2007. An NH_4 sensitive component dominates high-affinity K^+ uptake in tomato plants. *Plant Science*, 172, 273–280.
- ÖBORN L.; RANGEI A.; ASKEKAARD M.; GRANT C. A., WATSON' C. A.; EDWARDS A.C. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. 2005. Potassium management in agriculture. *Soil Use and Management* 21: 102 – 112.
- OCHOA M., W. A. 2001. Variabilidad espacial del Nitrógeno disponible en dos andisoles de la zona cafetera. Tesis: Ingeniero Agrónomo. Palmira (Colombia), Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 90 p.
- OLIVEIRA A., F. DE; CARMELLO Q., A. DE; MASCARENHAS, H. 2001. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa de vegetação.
- OLIVEIRA E. L. DE. 1993. Rendimento de matéria seca e absorção de cálcio e magnésio pelo milho em função de relação cálcio/magnésio do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 17:383–388.
- OLIVEIRA, E. F.; PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D. 1994. Respostas das mudas de cafeeiro ao equilíbrio entre cátions trocáveis em solos com cargas variáveis. *Arquivos de Biologia e Tecnologia (Brasil)* 37(4):973–979.
- OLIVEIRA, E. L.; PARRA, M. S. 2003. Resposta do feijoeiro a relações variáveis entre cálcio e magnésio na capacidade de troca de cátions de latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:859–866.
- PALMA, M. R. 1994. Estimación de los requerimientos de fertilización del café /*Coffea arabica*/ L. a partir del diagnóstico químico del suelo. In: SIMPOSIO sobre Caficultura Latinoamericana, 14. Ciudad de Panamá, Mayo 20–24, 1991. Tegucigalpa (Honduras), IICA–PROMECAFE. p. 431–445.
- PATIÑO G., M. A. 2005. Caracterización de la fertilidad del suelo en la zona cafetera del departamento del Valle del Cauca. Tesis: Ingeniera Agrónoma. Universidad de Caldas, Manizales (Colombia). 195 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; CAMARGO, A.P. & SOARES, E. Perdas de cálcio e magnésio durante cinco anos em ensaio de calagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 6:33–37, 1982.
- ROBBINS, C.W.; JURINAK, J.J.; WAGENET, R.J. 1980. Calculating cation exchange in a salt transport model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1195–1200.
- RICHARDS, L. A. (ed.), . *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Washington, US Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agriculture Handbook no. 60).
- SADEGHIAN K., S. 2003. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé*, 54(3):242–257.
- SADEGHIAN, K., S. 2003. Determinación de los niveles críticos de los nutrientes para el cultivo del café en suelos de la zona cafetera. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE*

CAFÉ. CHINCHINÁ. COLOMBIA. Informe anual de actividades de la disciplina suelos, octubre 2002–septiembre 2003. Chinchiná, CENICAFE, 2002. 30 p. (Proyecto SUE 3 – 18).

SADEGHIAN K., S.; ALVAREZ V., V.H. 2010. Calibración de análisis de suelos para potasio en café a partir de resultados obtenidos en una localidad. En: Congreso colombiano de la ciencia del suelo (15 : Octubre 27-29 2010 : Pereira). Pereira : SCCS.

SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. 2008. Almácigos de café con distintas proporciones de lombrinaza en suelos con diferente contenido de materia orgánica. *Cenicafé* 59(2):91–102.

SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S.; AMÉZQUITA C., E. 2004. Densidad aparente en dos suelos de la zona cafetera y efecto sobre el crecimiento del cafeto. *Cenicafé (Colombia)* 55(4):330–340.

SALAMANCA S., R. 1990. Suelos y fertilizantes. Universidad Santo Tomás, Bogotá. 345 p.

SALAZAR A., J. N. 1977. Respuesta de plántulas de café a la fertilización con nitrógeno, fósforo y Potasio. *Cenicafé (Colombia)* 28(2):61–66.

SALAZAR, A., J. N. 2000. Fertilización en almácigos de café. In: SIMPOSIO sobre Suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Chinchiná (Colombia), Julio 24–28, 2000. Ponencias. Chinchiná (Colombia), Cenicafé.

SILVA J. E. 1980. Balanço de cálcio e magnésio e desenvolvimento do milho em solos sob Cerrado. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 15(3):329–333.

SILVA, I. R.; MENDONÇA E. S. 2007. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., Ed. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.275–374.

SILVA, J. R. DA; MEURER E. J. 1988. Disponibilidade de potásio para as plantas em solos do Rio Grande do Sul em função da capacidade de troca de cátions. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:137–142.

SOIL IMPROVEMENT COMMITTEE CALIFORNIA PLANT HEALTH ASSOCIATION–SICCPHA. 2004. Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento. Noriega Editores. México. 366 p.

SORATTO, R, P.; CRUSCIOL, C. A. 2008. Métodos de determinação de cálcio e magnésio trocáveis e estimativa do calcário residual em um latossolo submetido à aplicação de calcário e gesso em superfície. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:663–673.

SPARKS, D. L., 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, San Diego. 352 p.

SPOSITO G. 2008. *The chemistry of soils*. 2. Ed. Oxford Univ. Press, New York. 329 p.

SPOSITO G. 2004. *The Surface Chemistry of Natural Particles*. Oxford Univ. Press, New York. 242 p.

STAUNTON S., ROUBAUD M. 1997. Adsorption of ^{137}Cs on montmorillonite and illite: Effect of charge compensating cation, ionic strength, Concentration of Cs, K and fulvic acid. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 45, No. 2, 251–260.

TAIRA, K.; FUJITA, N.; SORIN, T. 2004. A trial for soil diagnosis method of accumulated cation availabilities in a soil solution. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 75(1): 15–20.

TOMAZ M. A.; SILVA S. R.; SAKIYAMA N. S.; MARTINEZ H. E. P. 2003. Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *coffea arabica*. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:885–892.

UDO, E. J., 1978. Thermodynamics of potassium–calcium and magnesium–calcium exchange reactions on kaolinitic clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 556–560.

VALENCIA A., G. 1999. Fisiología, nutrición y fertilización del café. *Agroinsumos del café S. A.* 94 p.

WADA S. I.; SEKY H. 1994. Ca–K–Na exchange equilibria on a smectitic soil: Modeling the variation selectivity coefficient. *Japanese Society of Science and Plant Nutrition*. 40 (4), 629–636.

[http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Equilibrios _quimicos.pdf](http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Equilibrios_quimicos.pdf)

WOLT, J. D. 1994. *Soil solution chemistry: Applications to environmental science and agriculture*. John Wiley & Sons. New York. 345 p.

ZAPATA H., R. D. *Química de la acidez del suelo*. 2004. Cargraphics, Cali. 208 p.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMAN, J.; MIANO, T.; MILTNER, A.; SCHORTTH, G.; Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79 (1997): 117–161. 1997.