

# PROPIEDADES DE INTERCAMBIO K-Mg EN SUELOS DERIVADOS DE MATERIALES VOLCANICOS DE LA ZONA CAFETERA CENTRAL DE COLOMBIA

Martha Cecilia Henao-Toro\*; Bruno Delvaux\*\*

---

## RESUMEN

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

La dinámica de cationes en el campo depende, entre otros factores, de las propiedades de adsorción. Estas se estudiaron por medio del intercambio K-Mg, a una concentración total 0,005N, en nueve suelos derivados de cenizas volcánicas y un suelo derivado de rocas basálticas, representativos de la zona cafetera central colombiana. El número de sitios de adsorción selectiva de potasio, evaluado para un modelo a dos sitios, difiere en función del tipo de suelo. Entre los Andisoles, las unidades Chinchiná (Caldas) y Fresno (Tolima) se distinguieron por una cantidad muy baja de sitios específicos por este catión, contrariamente a las unidades Líbano (Tolima) y Montenegro (Quindío), donde la capacidad de almacenamiento de potasio fue mucho más alta, al igual que en el Alfisol de la unidad Malabar (Quindío) y en los Inceptisoles de las unidades Chinchiná (Quindío) y Parnaso (Valle). El poder tampón de potasio depende estrechamente de 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.

**Palabras claves:** Suelos, adsorción, intercambio, potasio, magnesio, cenizas volcánicas

---

## ABSTRACT

Cation dynamics in the field depends, among other factors, on ion sorption properties. Such properties were studied in nine volcanic ash soils and one soil derived from basaltic rock, all of which are representative of the central Colombian coffee-growing region, by evaluating K-Mg exchange at a 0.005N total chloride concentration. The number of K<sup>+</sup>-specific sites was estimated through a two-site model and differed according to soil type. Among the Andisols, Chinchiná (Caldas) and Fresno (Tolima) mapping units exhibited a very low quantity of K<sup>+</sup>-specific sites, unlike Líbano (Tolima) and Montenegro (Quindío) units, where ability to store potassium was much higher. The Alfisol (Malabar unit in Quindío) and Inceptisols (Chinchiná unit in Quindío, and Parnaso unit in Valle del Cauca) also exhibited a fair amount of K<sup>+</sup>-specific sites. Potassium buffer power was closely and positively related to both effective CEC and amount of K<sup>+</sup>-specific sites, and its magnitude increased with the weathering state and clay content of the soils studied.

**Key words:** Soils, adsorption, exchange, potassium, magnesium, volcanic ashes.

---

\* Asistente de Investigación, Química Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

\*\* Profesor Unidad de Ciencias del Suelo. Universidad Católica de Lovaina, Place Croix du Sud 2/10, 1348 Louvain la Neuve, Bélgica.

El conocimiento de las propiedades de intercambio catiónico del suelo es útil para interpretar la dinámica de cationes en campo. El uso de coeficientes de selectividad y la modelación de isotermas, proporciona información confiable sobre el comportamiento de intercambio entre iones mono y divalentes (10).

La selectividad por potasio ha sido estudiada mediante el equilibrio de intercambio K-Ca en suelos de diferente grado de evolución de Camerún, Martinica y Guadalupe, bajo cultivo de banano (6, 7, 17). Dichos trabajos han permitido determinar la susceptibilidad del potasio a la lixiviación, de acuerdo con la preferencia del suelo por este catión y dependiendo particularmente de la naturaleza de los constituyentes del complejo de intercambio. Esta información, confrontada con los estudios de la dinámica realizados *in situ*, ha sido aplicada a los programas de fertilización potásica de las bananeras, en función del tipo de suelo y del régimen pluviométrico.

El comportamiento del intercambio catiónico no está bien establecido en suelos derivados de cenizas volcánicas, principalmente en aquellos donde la alofana es dominante. Algunos estudios indican que los suelos alofánicos presentan una mayor selectividad por los iones divalentes sobre los monovalentes (6, 17, 18, 28). En Andisoles y suelos ándicos de las Islas Canarias, los coeficientes de selectividad de potasio generalmente disminuyen al aumentar el contenido de alofana en el suelo (11).

Por el contrario, en los horizontes B de tres Andepts chilenos, con más del 50% de alofana en la fracción arcillosa, Escudey y Galindo (10) observaron una preferencia general por los iones  $K^+$ , relacionada con la repulsión de carga en arcillas revestidas por óxidos de hierro, y por el tamaño de los iones hidratados en arcillas sin dichos revestimientos. En otros Andepts chilenos ricos en alofana se reporta una pequeña

proporción de sitios de fuerte selectividad potásica (34).

Parfitt (29), encontró en los horizontes superficiales de suelos alofánicos de Nueva Zelanda una mayor preferencia de potasio sobre calcio. Sin embargo, dicha selectividad potásica fue mucho menor que la encontrada en horizontes subsuperficiales de suelos ricos en vermiculita, vermiculita hidro-interlamina y mica.

En la zona cafetera colombiana, Gómez *et al.* (19) encontraron que algunos Andisoles muestran una adsorción selectiva por potasio.

Esta investigación tuvo como propósito estudiar las propiedades de intercambio K-Mg en las unidades de suelo más representativas de la zona cafetera central colombiana, para disponer de información que permita mejorar la nutrición en el cultivo del plátano (*Musa sp.* grupo AAB). El plátano es una especie exigente en potasio (4, 9), que además presenta deficiencias de magnesio comúnmente observables en campo. Dentro de las recomendaciones sobre la fertilización del cultivo en la mayoría de los suelos de la zona cafetera se incluye la aplicación de magnesio (21), por tanto, el conocimiento del intercambio de potasio con magnesio como ión competente es particularmente importante en estos suelos.

El intercambio K-Mg fue caracterizado a través de isotermas, que muestran la variación de  $N_K$  (fracción iónica equivalente de potasio en la fase en superficie,  $\bar{N}_K = K/(K+Mg)$ , con K y Mg en me/100g) en función de  $N_K$  (fracción iónica equivalente de potasio en la fase en solución,  $N_K = K/(K+Mg)$ , con K y Mg en me/L). Las isotermas de intercambio fueron establecidas bajo un modelo a dos sitios, según Dufey y Delvaux (8), en el cual el complejo de cambio involucra dos tipos de intercambiadores, unos de alta y otros de baja afinidad por los iones  $K^+$ . Las isotermas se calculan mediante

modelos de regresión no lineal, conformados a partir de ocho puntos experimentales. La ecuación de regresión de mejor ajuste permite cuantificar los coeficientes de selectividad de Vanselow ( $K_{V_1}$  en los sitios de alta y  $K_{V_2}$  en los sitios de baja afinidad) y la proporción de sitios de intercambio de alta afinidad ( $\alpha_1$ ) por potasio.

La selectividad en los sitios de intercambio es determinada en cada punto de la isoterma por los coeficientes de Gapon ( $K_G$ ) y Vanselow ( $K_V$ ), calculados a través de las siguientes expresiones:

$$K_G = \frac{\bar{N}_K / \bar{N}_{Mg}}{KAR} \quad \ll 1 \gg$$

$$K_V = \frac{M_K^2 / M_{Mg}}{KAR^2} \quad \ll 2 \gg$$

Donde  $\bar{N}_K$  y  $\bar{N}_{Mg}$  son las fracciones equivalentes de K y Mg en superficie (K, Mg adsorbidos sobre el complejo de intercambio, en me/100g),  $M_K$  y  $M_{Mg}$  son las fracciones molares de K y Mg en superficie (K, Mg adsorbidos, en mmol/100g) y KAR es la relación de actividades iónicas  $K/\sqrt{Mg}$  en (mol/L)<sup>1/2</sup>.

Adicionalmente se establecieron curvas Q/I (1), las cuales caracterizan el poder tampón de potasio del suelo, dependiendo de la cantidad de potasio potencialmente disponible (Q) y de la intensidad con la cual es retenido en los sitios de intercambio (I). Estas curvas representan la variación de K intercambiable en función de la relación de actividades iónicas KAR. La gráfica obtenida comprende una parte curva ligada al número de sitios de intercambio específicos para potasio, y otra lineal ligada al intercambio Mg-K sobre los sitios no específicos. La pendiente de la parte lineal corresponde al poder tampón (20), y mide la capacidad del

intercambiador de abastecer de potasio a la solución del suelo desde los sitios de intercambio catiónico.

## MATERIALES Y METODOS

**Suelos.** Los suelos estudiados (Tabla 1), son representativos de las unidades Chinchiná, Fresno, Líbano, Montenegro, Malabar y Parnaso, cuyas muestras se obtuvieron en los departamentos de Caldas, Quindío, Tolima y Valle. Con excepción de la unidad Parnaso, Inceptisol desarrollado sobre basaltos hornblendo-biotíticos (12), las unidades estudiadas se forman a partir de cenizas volcánicas andesíticas y cuarzoandesíticas (14, 25).

Las unidades Chinchiná en Caldas, Fresno, Líbano y Montenegro corresponden a Andisoles, según la clasificación del USDA (36), mientras que la unidad Chinchiná en Quindío ha sido clasificada como un Inceptisol con características ándicas. La unidad Malabar proviene de cenizas volcánicas muy evolucionadas, razón por la cual el perfil ha perdido las características ándicas y ha desarrollado un horizonte argílico (B<sub>1</sub>), resultando clasificado como un Alfisol (14).

**Caracterización química.** Esta se realizó mediante los siguientes métodos: El pH en agua, materia orgánica, cationes intercambiables y CIC fueron determinados por los métodos empleados en Cenicafé (3); la retención de fosfatos por el método de Blakemore *et al.* (2); el porcentaje de arcilla por el método de la granulometría con resina sódica (16, 32); los elementos totales (bases y Fe<sub>T</sub>) por fusión con meta y tetraborato de litio a 1100°C en crisol de grafito; el porcentaje de alofana se calculó de acuerdo a Mizota y van Reeuwijk (27), a partir de los valores de Al<sub>0</sub> y Si<sub>0</sub>, obtenidos por extracción con oxalato ácido de amonio 0,2M pH 3 durante cuatro horas en la oscuridad (2) y

**TABLA 1.** Clasificación y localización de los suelos estudiados

Unidad <sup>1/</sup>	Clasificación <sup>2/</sup>	Localidad	Altitud (m)	Horizonte		Referencia	
Chinchiná	Acrudoxic Melanudands	Palestina, Caldas	1600	Ap	Bw	CH1-A	CH1-B
Chinchiná	Acrudoxic Melanudands	Naranjal, Caldas	1400	Ap	Bw	CH2-A	CH2-B
Chinchiná	Andic Dystropepts	Paraguacito, Quindío	1270	Ap	Bw	CH3-A	CH3-B
Fresno	Acrudoxic Hapludands	Petaqueros, Tolima	1900	Ap	Bw	FR1-A	FR1-B
Fresno	Acrudoxic Hydric Melanudands	Fresno, Tolima	1470	Ap	Bw2	FR2-A	FR2-B
Líbano	Typic Melanudands	Convenio, Tolima	1450	Ap	Bw	LB1-A	LB1-B
Líbano	Acrudoxic Melanudands	Líbano, Tolima	1250	Ap	Bw	LB2-A	LB2-B
Montenegro	Typic Udivitrands	Montenegro, Quindío	1360	Ap	Bw	MN-A	MN-B
Malabar	Vertic Tropudalfs	Montenegro, Quindío	1360	Ap	Bt	ML-A	ML-B
Parnaso	Typic Dystropepts	Sevilla, Valle	1600	Ap	Bw	PR-A	PR-B

<sup>1/</sup> Clasificación cartográfica de la Federación Nacional de Cafeteros (12, 13, 14, 15)

<sup>2/</sup> Clasificación taxonómica del USDA (36)

de  $Al_p$ , obtenido por extracción con pirofosfato de sodio 0,1M durante 16 horas (35);  $Fe_d$  por extracción a 80°C durante 15 minutos con ditionito y citrato de sodio tamponado a pH=8 (26).

**Equilibrios de intercambio.** Para el establecimiento de las isotermas de intercambio K-Mg se utilizó la metodología adoptada por Delvaux *et al.* (6). Cada isoterma se construyó con ocho puntos, para lo cual se prepararon las solucio-

nes mixtas de KCl y  $MgCl_2 \cdot H_2O$  de concentración total 0,005N indicadas en la Tabla 2.

Para obtener cada punto, el procedimiento consistió en agitar 3 g de suelo durante 1 hora a 20°C con 30 ml de la solución mixta de KCl y  $MgCl_2 \cdot H_2O$  1N correspondiente, y posteriormente efectuar agitaciones sucesivas de 1 hora, con 30 ml de solución mixta de KCl y  $MgCl_2 \cdot H_2O$  0,005N del mismo KAR, hasta alcanzar el equilibrio suelo-solución. Después de cada agi-

**TABLA 2.** Variación de la concentración de potasio, relación de actividades iónicas (KAR) y fracción iónica en K ( $N_K$ ) de las soluciones empleadas.

K (me/L)	0,14	0,29	0,58	1,18	1,87	2,62	3,49	4,53
KAR (mmol/L) <sup>1/2</sup>	0,09	0,19	0,39	0,86	1,48	2,39	4,02	10,35
$N_K$ (K, Mg en me/L)	0,03	0,06	0,12	0,24	0,37	0,52	0,70	0,92

tación, la solución se retiró por centrifugación. La condición de equilibrio se alcanzó cuando las concentraciones de potasio y magnesio en el sobrenadante se mantuvieron iguales a las de la solución inicial 0,005N. Sobre el residuo de suelo se extrajeron  $K^+$  y  $Mg^{2+}$  intercambiables mediante una primera agitación de dos horas y dos siguientes de una hora con 30 ml de  $NH_4Cl$  1N.

## RESULTADOS Y DISCUSION

**Caracterización de los suelos.** Algunas características de los suelos estudiados se presentan en la Tabla 3. Los índices de alteración (porcentaje de arcillas, reserva total de bases y  $Fe_d/Fe_t$ ),

la relación binaria  $Al_p/Al_o$  y la relación atómica  $Al/Si$  en las alofanas (calculada como  $Al_o-Al_p/Si_o$ ), se presentan en la Tabla 4.

Las Tablas 3 y 4 muestran que los Andisoles de las unidades Chinchiná, Fresno y Líbano presentan altos contenidos de materia orgánica, alta capacidad de retención de fosfatos y baja saturación de bases. La unidad Montenegro se caracteriza por un contenido notablemente más bajo de alofana en el horizonte B, horizonte en el cual se tiene la reserva total de bases más alta encontrada en los suelos estudiados; así mismo, el contenido de arcilla en el perfil y de materia orgánica en el horizonte A son bajos, con respecto a los otros Andisoles. En contraste con los Andisoles, el Alfisol (unidad Malabar) tiene bajo contenido de materia orgánica y alta satu-

TABLA 3. Algunas características químicas de los suelos estudiados.

Ref.	pH en $H_2O$	%RF <sup>1/</sup>	%MO	% Alofana <sup>2/</sup>	K	Ca	Mg	Al	CIC <sup>3/</sup>
CH1-A	4,9	90	10,2	11	0,21	0,3	0,1	0,6	26
CH1-B	4,8	90	3,5	14	0,06	0,2	0,0	0,2	16
CH2-A	5,9	91	9,2	11	0,11	0,6	0,1	0,4	27
CH2-B	6,1	91	3,2	18	0,05	1,0	0,1	0,2	19
CH3-A	5,5	65	6,0	4	0,82	7,0	1,4	0,2	24
CH3-B	6,2	81	0,7	13	0,60	5,2	0,4	0,1	17
FR1-A	5,2	95	15,7	7	0,11	0,7	0,1	0,9	40
FR1-B	6,3	93	3,8	17	0,04	0,5	0,0	0,1	18
FR2-A	5,2	96	12,8	16	0,20	0,2	0,1	0,3	27
FR2-B	6,2	97	2,0	28	0,08	0,7	0,1	0,1	16
LB1-A	5,1	93	15,8	12	0,98	2,3	0,3	0,9	29
LB1-B	5,6	96	2,9	28	0,55	2,1	0,1	0,0	22
LB2-A	5,1	91	11,2	8	0,11	0,7	0,2	1,2	25
LB2-B	5,7	95	0,7	23	0,05	0,6	0,2	0,0	21
MN-A	5,3	61	5,8	3	0,20	3,0	0,5	0,3	15
MN-B	5,5	54	0,5	3	0,27	1,2	0,3	0,0	7
ML-A	5,9	25	1,6	0	0,45	5,8	0,9	0,0	12
ML-B	6,2	50	0,3	1	1,03	7,9	2,1	0,1	20
PR-A	5,2	68	8,2	3	0,21	5,3	1,2	0,4	22
PR-B	6,0	51	2,3	0	0,08	6,2	0,9	0,1	8

<sup>1/</sup> Retención de fosfatos

<sup>2/</sup> Estimada según Mizota y van Reeuwijk (27)

<sup>3/</sup> Capacidad de intercambio catiónico

**TABLA 4.** Índices de alteración de los suelos estudiados y relaciones composicionales de las alofanas en la tierra fina (fracción < 2 mm).

Referencia	% arcilla	RTB * me/100g	Fe <sub>d</sub> /Fe <sub>t</sub>	Al <sub>p</sub> /Al <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub> -Al <sub>p</sub> /Si <sub>o</sub>
CH1-A	34	370,2	0,22	0,20	1,87
CH1-B	39	374,3	0,25	0,08	1,69
CH2-A	36	358,5	0,23	0,13	1,98
CH2-B	40	391,0	0,21	0,06	1,66
CH3-A	40	325,1	0,24	0,51	0,97
CH3-B	43	340,0	0,22	0,08	1,29
FR1-A	40	333,4	0,20	0,41	2,27
FR1-B	34	382,6	0,18	0,08	1,90
FR2-A	42	328,5	0,29	0,19	1,89
FR2-B	47	291,6	0,31	0,05	1,60
LB1-A	47	320,8	0,29	0,27	1,81
LB1-B	57	280,0	0,34	0,04	1,56
LB2-A	51	208,7	0,52	0,33	1,54
LB2-B	54	259,5	0,41	0,05	1,50
MN-A	28	362,4	0,19	0,56	0,96
MN-B	24	413,6	0,13	0,09	1,69
ML-A	24	394,0	0,16	-	-
ML-B	57	287,0	0,31	0,61	0,73
PR-A	52	255,0	0,58	0,44	1,39
PR-B	85	59,0	0,72	0,08	1,51

\* Reserva total en bases.

ración de bases. También es posible observar que el horizonte Ap de la unidad Parnaso presenta influencia de cenizas volcánicas recientes, debido a la presencia de alofana y de una reserva total de bases relativamente alta .

De los índices de alteración presentados en la Tabla 4, la reserva total de bases (RTB) corresponde a la suma de bases totales Ca, Mg, Na y K en me/100g, y según Herbillon (23), es un estimador de los minerales alterables en el suelo. Por su parte, Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> representa la tasa de individualización del hierro libre, la cual es alta en suelos evolucionados.

Estos índices han permitido constatar que los Andisoles y el suelo ándico estudiados se encuentran en diferente estado de evolución, de tal modo que:

- La unidad Montenegro corresponde al perfil menos evolucionado.

- La unidad Chinchiná en Paraguaicito (Quindío) presenta un mayor grado de evolución que Palestina y Naranjal (Caldas).
- La secuencia de alteración de los Andisoles aumenta en la unidad Líbano, siendo el perfil LB2 el más alterado.

El contenido de arcilla aumenta con el grado de evolución de los suelos estudiados, tal como lo muestra la correlación negativa altamente significativa del porcentaje de arcilla con la reserva total de bases (r=0,93), y positiva con Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> (r=0,87). Estos dos parámetros muestran que la unidad Parnaso corresponde al perfil más evolucionado de todos los suelos muestreados.

**Propiedades de intercambio K-Mg.** Isotermas de intercambio K-Mg y coeficientes de selectividad de Gapon. En la Figura 1 se presentan las isotermas de intercambio K-Mg obtenidas

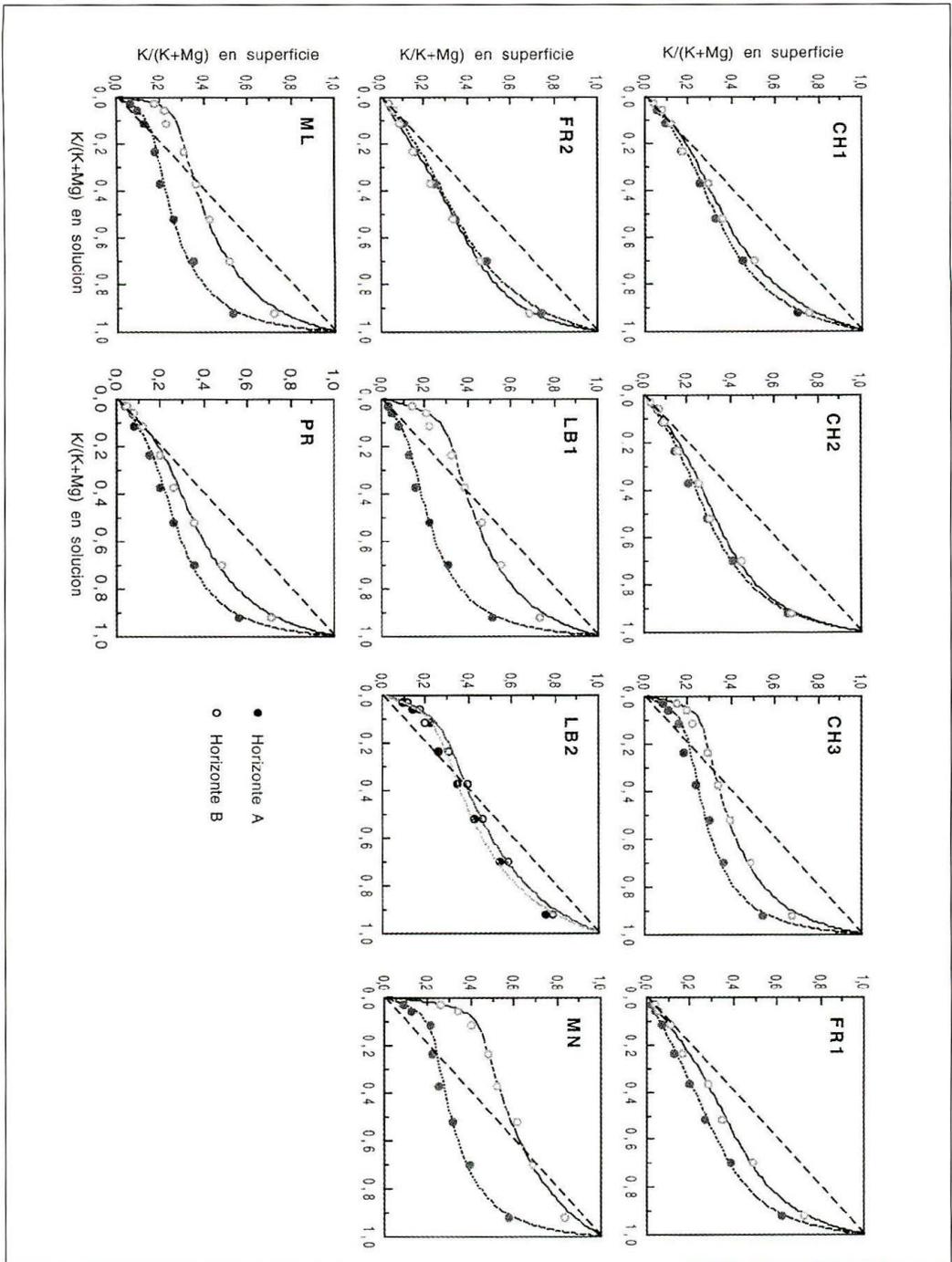


Figura 1. Isothermas de intercambio K-Mg sobre tierra fina (fracción menor de 2 mm), bajo un modelo a dos sitios.

para cada perfil en los dos horizontes considerados. En la Figura 2 se muestra la variación del coeficiente de selectividad de Gapon ( $K_G$ ) en función de la fracción equivalente de potasio en superficie ( $\bar{N}_K$ ). La carga total de los suelos obtenida de la suma de los cationes K y Mg adsorbidos ( $CICE_{K+Mg}$ ), y los parámetros del modelo  $\alpha_1$ ,  $Kv_1$  y  $Kv_2$  se dan en la Tabla 5, al igual que la cantidad de sitios específicos, calculada como  $\alpha_1 \cdot CICE_{K+Mg}$  y el valor de  $K_G$  medido para una solución de  $N_K=0,03$  ( $K_{G,0.03}$ ).

Las Figuras 1 y 2 permiten observar que la más baja afinidad por potasio se presenta en la unidad Chinchiná en el departamento de Caldas (suelos CH1 y CH2) y en la unidad Fresno (suelos FR1 y FR2). La unidad Parnaso (PR) muestra una afinidad por potasio ligeramente

mayor. En estos pedones, con excepción de FR2, la selectividad por potasio es más baja en los horizontes superficiales. En las demás unidades (Líbano, Montenegro, Malabar y Chinchiná en Quindío), donde la preferencia por potasio se vuelve importante, la diferencia entre la selectividad entre los horizontes A y B es muy marcada. De otra parte, al comparar la selectividad de los horizontes A de los suelos estudiados, se observa que los horizontes más selectivos corresponden a los suelos más pobres en materia orgánica, con excepción de LB2. La más débil selectividad potásica de los horizontes orgánicos se ha registrado ampliamente en los trabajos sobre adsorción de este catión (6, 7, 17, 19). Schachtschabel (33) la ha atribuido a la preferencia de los sitios de cambio de tipo orgánico por los iones calcio.

TABLA 5. Variables determinadas en el equilibrio de intercambio K-Mg.

Ref.	CICE <sup>1/</sup>		$\alpha_1$	$\alpha_1 \cdot CICE_{K+Mg}$ <sup>2/</sup>	$Kv_1$ <sup>3/</sup>	$Kv_2$ <sup>3/</sup>	$K_{G,0.03}$ <sup>4/</sup>
	Media	DS					
CH1-A	2,19	0,14	0,18	0,39	4000	24	13,2
CH1-B	1,56	0,09	0,17	0,27	7000	36	14,8
CH2-A	2,52	0,13	0,15	0,38	4000	19	11,4
CH2-B	2,55	0,11	0,20	0,51	3000	19	12,9
CH3-A	10,62	0,42	0,18	1,91	56000	9	32,7
CH3-B	7,44	0,37	0,25	1,86	160000	19	64,3
FR1-A	3,63	0,14	0,20	0,73	1100	13	9,2
FR1-B	2,01	0,16	0,26	0,52	1800	22	13,7
FR2-A	2,24	0,13	0,18	0,40	3100	31	14,4
FR2-B	3,88	0,24	0,28	1,09	1000	16	14,1
LB1-A	7,16	0,18	0,11	0,79	13000	9	11,7
LB1-B	6,38	0,48	0,29	1,85	65000	27	59,0
LB2-A	4,10	0,23	0,23	0,94	50000	36	37,9
LB2-B	4,05	0,23	0,26	1,05	43000	45	45,9
MN-A	5,66	0,31	0,21	1,19	65000	10	34,8
MN-B	2,79	0,27	0,42	1,17	198000	51	122,7
ML-A	7,43	0,70	0,15	1,11	45000	9	23,5
ML-B	14,07	0,92	0,26	3,66	236000	25	75,8
PR-A	8,13	0,28	0,16	1,30	6000	10	15,7
PR-B	7,23	0,18	0,20	1,45	6000	25	18,0

<sup>1/</sup> Valor promedio y desviación estándar de (K+Mg) adsorbidos en me/100g

<sup>2/</sup> me/100g

<sup>3/</sup> (mol/L)<sup>-1</sup>

<sup>4/</sup>  $K_G$  determinado para  $N_K = 0,03$  en (mol/L)<sup>1/2</sup>

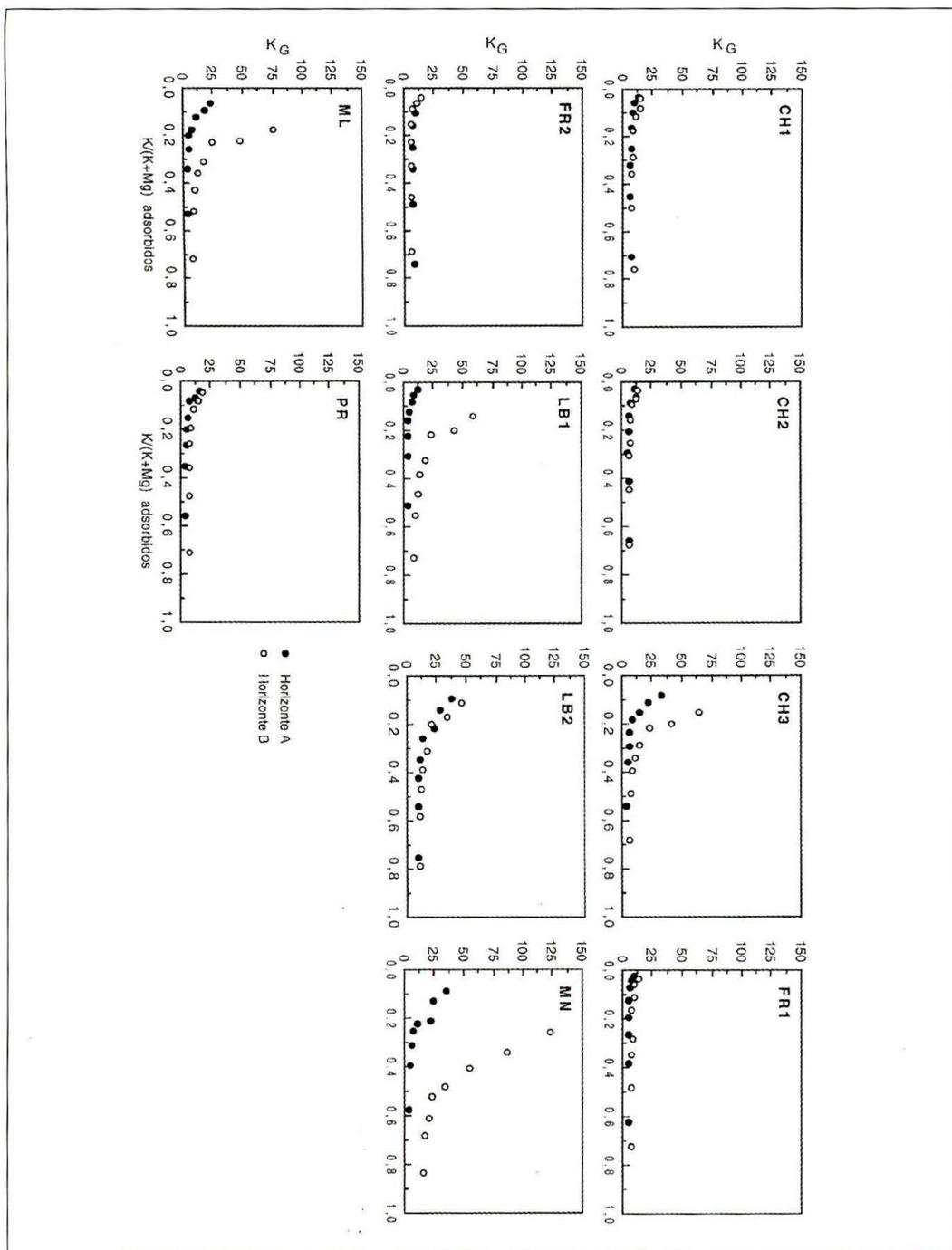


Figura 2. Variación de los coeficientes de selectividad de Gapón  $(\text{mol/L})^{-1}$  en función de la fracción equivalente de potasio en superficie  $(N_K)$ .

En los horizontes B, donde se presenta la mayor selectividad por potasio, los valores de la proporción de sitios específicos  $\alpha$  y de  $K_G$  disminuyeron en el siguiente orden: MN > ML > CH3 > LB1 > LB2. Sin embargo, cuando se tiene en cuenta la cantidad o número de sitios específicos de adsorción para potasio ( $\alpha_1 \cdot CICE_{K+Mg}$ ), el orden cambia a ML > CH3 > LB1 > MN > LB2, y las diferencias en la selectividad por potasio dejan de ser tan marcadas aún entre los suelos no selectivos (CH1, CH2, FR1, FR2 y PR) con respecto a los selectivos (MN, ML, CH3, LB1 y LB2).

El número de sitios específicos para potasio determinados en los Andisoles incluidos en este estudio varía entre 0,29 y 1,91 me/100g, valores comparables con los reportados en la literatura para otros Andisoles (7, 17). El valor

más alto de los Andisoles sólo fue superado por el horizonte B del Alfisol (ML), con  $\alpha_1 \cdot CICE_{K+Mg}$  de 3,66 me/100g, el cual está caracterizado por la ausencia de alofana y un tenor bajo de materia orgánica.

A pesar de su mayor selectividad y de poseer más de 40% de sitios específicos para potasio, la baja capacidad de intercambio catiónica efectiva del horizonte B de la unidad Montenegro le permite disponer de pocos sitios de adsorción, y por tanto el potasio puede ser lixiviado en una magnitud similar que en otros horizontes no selectivos.

**Curvas Q/I.** Las curvas obtenidas aparecen en la Figura 3 y el poder tampón de los suelos en la Tabla 6. Teniendo en cuenta que en invernadero el banano logra más del 90% de crecien-

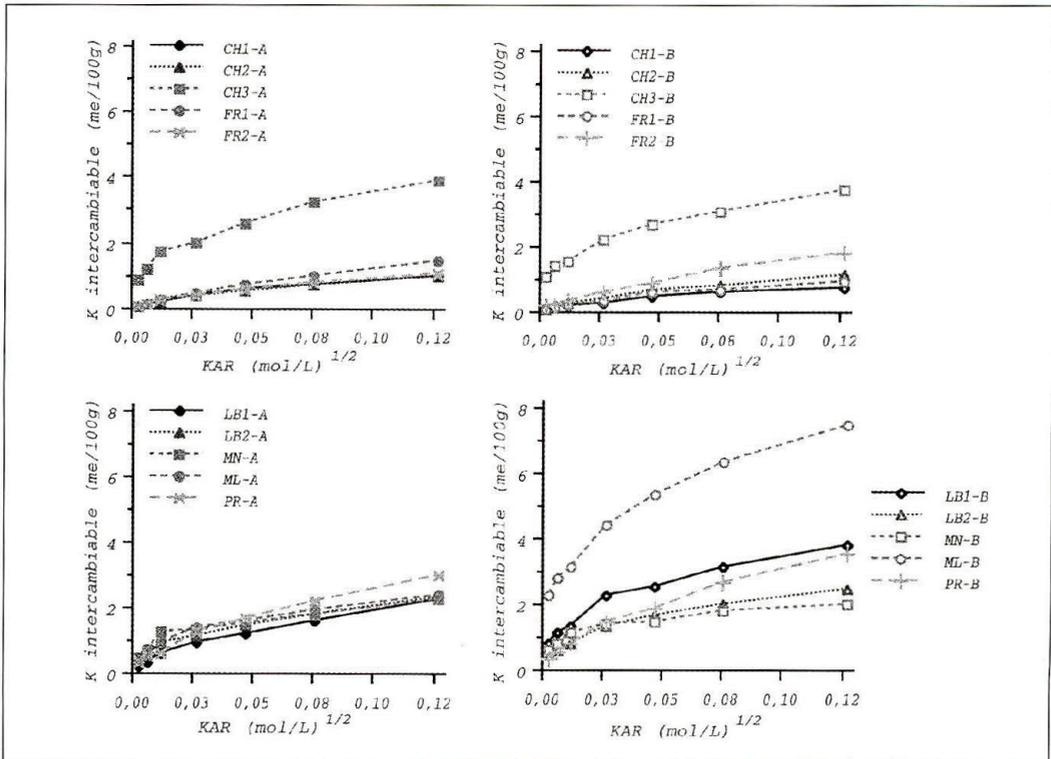


Figura 3. Curvas Q/I establecidas a partir del equilibrio de intercambio K-Mg.

**TABLA 6.** Poder tampón (me/100g)/(mol/L)<sup>1/2</sup> calculado como la pendiente de la parte lineal de las curvas Q/I.

Referencia	Horizonte A	Horizonte B
CH1	5,4	4,6
CH2	6,3	6,7
CH3	18,8	14,7
FR1	9,4	5,3
FR2	6,7	11,6
LB1	13,3	15,7
LB2	12,2	11,1
MN	9,8	6,5
ML	10,1	29,9
PR	17,1	20,7

to con concentraciones de K en solución de 146 ppm (24) y que la concentración de potasio en la solución del suelo en la unidad Chinchiná y la unidad Parnaso varía entre 10 y 200 ppm (22), se consideró un intervalo de KAR entre 0,0028 y 0,1272 (mol/L)<sup>1/2</sup>, correspondiente a 5 y 136 ppm de K en solución, que refleja bien los requerimientos reales del cultivo y las concentraciones normales del K en la solución del suelo bajo condiciones de campo.

El poder tampón observado cubre un intervalo entre 4,6 y 29,9 (me/100g)/(mol/L)<sup>1/2</sup>, lo que permite decir que todos los suelos considerados en estudio presentan una capacidad relativamente baja de resistir los cambios en la concentración de potasio en solución, si se compara con el poder tampón en otros tipos de suelos, que poseen esmectitas o haloisitas en su fracción arcillosa (5, 20).

En los Andisoles (unidades Chinchiná, Fresno, Líbano y Montenegro), los valores calculados varían entre 4,6 y 18,8 (me/100g)/(mol/L)<sup>1/2</sup>, resultando similares a los encontrados por Fontaine *et al.* (1989) en suelos derivados de cenizas volcánicas de Martinica, entre 3,4 y 13,4. En estas unidades se encontró el siguiente orden del poder tampón: Chinchiná (Quindío) > Líbano > Fresno y Montenegro > Chinchiná (Caldas).

Los resultados permiten observar que la unidad Chinchiná en el departamento de Caldas (CH1 y CH2) no tiene la capacidad de restituir adecuadamente el potasio que se pierde de la solución del suelo, ya sea por lixiviación o por absorción de la raíz, en ninguno de los horizontes del suelo. Esta situación es menos crítica en el caso de la unidad Fresno, sobretodo en el horizonte B del perfil FR2, el cual presenta un mayor poder tampón. En cambio, la unidad Chinchiná en el departamento del Quindío puede compensar más fácilmente las disminuciones de K que se presenten en la solución del suelo, a partir del potasio intercambiable.

El suelo con mayor poder tampón es el horizonte B<sub>t</sub> del Alfisol perteneciente a la unidad Malabar, con 30 (me/100g)/(mol/L)<sup>1/2</sup>. El horizonte B de la unidad Parnaso, rico en óxidos de hierro cristalinos y caolinita, presenta también un poder tampón relativamente alto, comparable al de Oxisoles y Ultisoles caolíníficos que poseen hierro cristalino y óxidos e hidróxidos de hierro amorfos (20).

**Relación entre la retención de potasio y las propiedades y constituyentes del suelo.** Ninguna de las características o propiedades de los suelos estudiados permite explicar satisfactoriamente la cantidad de sitios específicos ni las diferencias de selectividad por potasio en los procesos de intercambio K-Mg.

La alta afinidad cálcica atribuida a la alofana, explica el aumento de la selectividad potásica a medida que desaparecen los materiales amorfos en suelos volcánicos de Martinica (17). En los suelos volcánicos considerados en este estudio, el contenido de alofana y la selectividad por potasio no presentan una relación definida. La composición de la alofana parece jugar un papel más importante en dicha afinidad potásica, tal como lo evidencia la relación altamente significativa y negativa entre el número de sitios selectivos y la relación atómica

$Al_o-Al_p/Si_o$  (Figura 4), mostrando que en los suelos estudiados cuyas alofanas son más ricas en aluminio, se presentan menos sitios selectivos por potasio.

Esta observación está de acuerdo con van Reeuwijk y de Villiers (37), quienes encontraron una mayor fijación de potasio en aluminosilicatos de composición más silíceo. También coincide con los resultados de Perrot (31), que indican una mayor preferencia por  $Mg^{2+}$  en la selectividad de intercambio K-Mg, por parte de los aluminosilicatos amorfos de alto  $Al/(Al+Si)$ , la cual aumenta a pH alto.

Van Reeuwijk y de Villiers (37) atribuyen la fijación de potasio a la presencia de canales en la estructura del gel, que ejercen un efecto de tamiz al no permitir el paso de los iones  $Ca^{2+}$ , de mayor radio de hidratación que los iones  $K^+$ . Perrot (31) también confirma la existencia de canales que tienen una influencia estérica sobre la selectividad de intercambio K-Mg; este autor plantea que en los aluminosilicatos más aluminosos, los hidróxidos de aluminio pueden adsorber específicamente magnesio.

De otro lado, según Grimme (20) el poder tampón de potasio depende principalmente del

contenido y mineralogía de las arcillas y del pH. La dependencia con la cantidad de arcilla en los suelos estudiados se puede visualizar en la Figura 5a, donde se observa la tendencia de los suelos a presentar un mayor poder tampón a medida que aumenta el porcentaje de arcilla. En general el poder tampón aumenta a medida que crece el grado de evolución del suelo, lo cual se pone de manifiesto a través de la relación inversa con la RTB (Figura 5b).

La capacidad de intercambio catiónica efectiva, calculada por la suma de K, Ca, Mg y Al extraídos con  $NH_4OAc$  1N pH 7, está ligada directamente con el poder tampón, tal como lo evidencia la correlación positiva altamente significativa ( $r=0,86$ ). La ausencia de relación con la CIC, evidencia que la CICE refleja mejor la cantidad de carga disponible, siendo los suelos estudiados de carga variable dependiente del pH. De otra parte, resulta lógico encontrar que a mayor número de sitios específicos por potasio, mayor será el K intercambiable disponible para reabastecer la concentración en la solución del suelo.

Al establecer una regresión múltiple entre el poder tampón y las variables CICE y  $\alpha_1 \cdot CICE_{K+Mg}$  se encuentra la siguiente ecuación:

$$\text{Poder tampón} = 3,58 + 5,01\alpha_1 \cdot CICE_{K+Mg} + 0,70CICE_{(K+Ca+Mg+Al)} \quad (R^2 = 0,86) \quad <<3>>$$

Es importante constatar que el poder tampón depende a la vez de la carga total (CICE) y de la selectividad del intercambiador por el ión potasio, evaluado por la cantidad de sitios específicos.

**Consideraciones sobre el manejo de la fertilización.** Teniendo en cuenta que los horizontes A de los perfiles CH1, CH2 y FR2 son muy poco selectivos por potasio y presentan un bajo poder tampón, resultan potencialmente vulne-

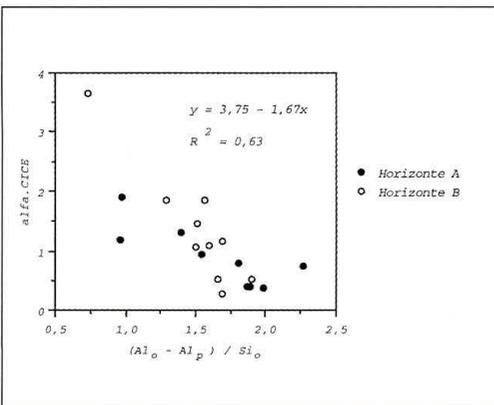


Figura 4. Variación del número de sitios específicos por potasio en función de la relación atómica Al/Si en las alofanas.

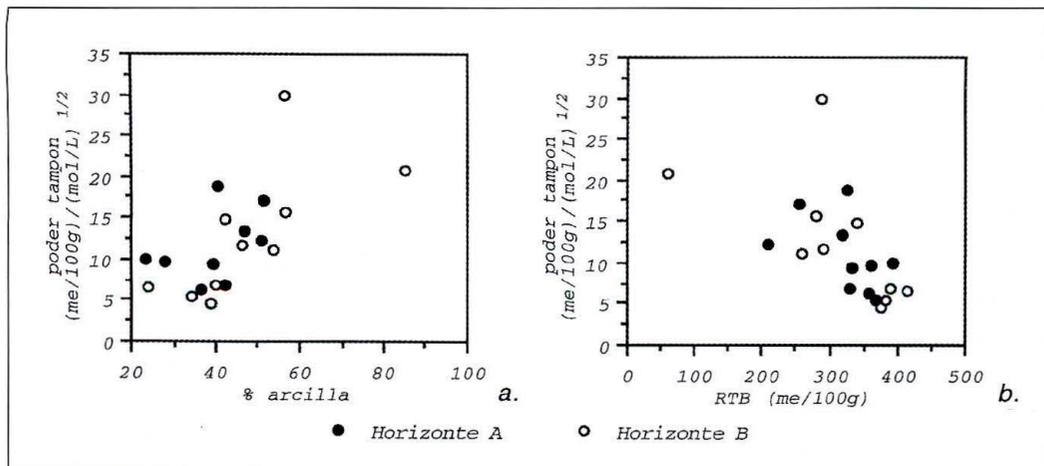


Figura 5. Relación entre el poder tampón de K y algunas características del suelo

rables a pérdidas considerables de este elemento aplicado como fertilizante. En los perfiles de la unidad Chinchiná, el comportamiento del horizonte B es similar, lo que implica que el potasio puede perderse completamente del perfil. En el caso de FR2, dado que el horizonte B presenta una selectividad más alta que el A y un poder tampón mucho más importante, parte del potasio que es lixiviado del horizonte superficial puede ser retenido en el horizonte subsuperficial y permanecer disponible para la absorción por las raíces más profundas. La fertilización potásica en estos suelos debe, por tanto, ser adecuadamente fraccionada.

La unidad Líbano corresponde a un Andisol que favorece más la permanencia del K en el suelo. Los perfiles LB1 y LB2 permiten un mejor reabastecimiento del potasio de la solución del suelo.

Por su parte, el complejo de intercambio del horizonte A de la unidad Chinchiná en el Quindío presenta una alta selectividad potásica, una alta CICE y un fuerte poder tampón, lo que garantiza una buena disponibilidad de potasio

para el cultivo siempre y cuando los demás aspectos que afectan dicha disponibilidad, tal como el balance catiónico, sean adecuados. En CH3 puede efectuarse la adición de fertilizantes potásicos con una menor frecuencia que en los otros suelos.

Los horizontes A de los perfiles FR1, MN y ML se encuentran en una situación intermedia entre el primer grupo de suelos mencionado y la unidad Líbano, por lo cual también puede ser necesario el fraccionamiento de la fertilización.

Por último, la unidad Parnaso, a pesar de su relativamente baja selectividad por potasio, posee una CICE más o menos importante que le permite contar con un número de sitios específicos más alto que otros suelos con similar proporción de dichos sitios; además tiene un mayor poder tampón que a su vez le permite compensar los cambios en la concentración de potasio de la solución del suelo. Gracias a estas propiedades de intercambio, el potasio de la unidad Parnaso puede permanecer por más tiempo en el perfil y no producir deficiencias marcadas.

En general se deduce que la unidad Chinchiná en el departamento de Caldas y la unidad Fresno corresponden a Andisoles vulnerables a la lixiviación de potasio, debido a la baja selectividad, bajo número de sitios específicos y bajo poder tampón. Estas condiciones son menos críticas en la unidad Líbano. La unidad Montenegro, a pesar de su alta selectividad, no puede retener potasio en forma considerable debido a su baja CICE ligada a un bajo poder tampón, lo que puede incidir en una relativamente rápida lixiviación del elemento. El poder tampón del suelo presenta una tendencia a aumentar paralelamente al incremento del contenido de arcilla y del grado de evolución del suelo.

### AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido realizado con el apoyo financiero del proyecto UE/CSI CT-930028 suscrito entre la CEE y el CIRAD (Francia), la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) y la Federación Nacional de Cafeteros y el ICA (Colombia). Los autores expresan su sincero reconocimiento a los técnicos de los Laboratorios de Química Agrícola de Cenicafé y de la Unidad de Suelos de la Universidad Católica de Lovaina, quienes efectuaron algunos de los análisis presentados en este estudio.

### LITERATURA CITADA

1. BECKETT, P. H. T. Studies on soil potassium. II. The immediate Q/I relations of labile potassium in the soil. *Journal of Soil Science* 15:9-23. 1964.
2. BLAKEMORE, L. C.; SEARLE, P. L.; DALY, B. K. Methods for chemical analysis of soils. 2. revision. New Zealand Soil Bureau, 1981. (Scientific Report 10A).
3. CARRILLO, I. F.; VINASCO, C. A. Guía para el servicio regional de análisis de suelos. Chinchiná, CENICAFE, 1992. 79 p.
4. DELVAUX, B. Soils. In: GROVENS, S. ed. Bananas and plantains. London, Chapman and Hall, 1995. p. 230-257.
5. DELVAUX, B. Constituants et propriétés de surface des sols dérivés de pyroclastes basaltiques du Cameroun Occidental. Approche génétique de leur fertilité. Louvain la Neuve, Université Catholique de Louvain, 1988. 335 p. (Thèse: Docteur en Sciences Agronomiques).
6. DELVAUX, B.; DUFEY, J.; VIELVOYE, L.; HERBILLON, A. J. Potassium exchange behavior in a weathering sequence of volcanic ash soils. *Soil Science Society of America Journal* 53:1679-1684. 1989.
7. DELVAUX, B.; VIELVOYE, L.; DOREL, M. Comportement d'échange du potassium dans les sols de la bananeraie guadeloupéenne. Application à la programmation de la fumure potassique. *Fruits* 46(1):3-11. 1991.
8. DUFEY, J.; DELVAUX, B. Modeling potassium-calcium exchange isotherms in soils. *Soil Science Society of America Journal* 53:1297-1299. 1989.
9. ECHEVERRI, M. J. Fertilización del plátano (*Musa ABB*) en la zona cafetera colombiana. In: MANUAL sobre el cultivo del plátano. Chinchiná, CENICAFE - Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, 1989. p. 48-56.
10. ESCUDEY, M.; GALINDO, G. Potassium-calcium exchange on inorganic clay fractions of Chilean Andepts. *Geoderma* 41:275-285. 1988.
11. ESPINO-M., M.; HERNANDEZ-M., J. M. Potassium selectivity in Andic soils in relation to induced acidity, sulfate status and layer silicates. *Geoderma* 61:191-201. 1994.
12. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Valle del Cauca. Bogotá, FEDERACAFE, 1990. 215 p.
13. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Risaralda. Bogotá, FEDERACAFE, 1988. 265 p.
14. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Quindío. Bogotá, FEDERACAFE, 1986. 148 p.

15. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Caldas. Bogotá, FEDERACAFE, 1982. 310 p.
16. FELLER, C.; BURTIN, G.; GERARD, B.; BALESSENT, J. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêt et limites. *Science du Sol* 29(2):77-93. 1991.
17. FONTAINE, S.; DELVAUX, B.; DUFEY, J. E.; HERBILLON, A. J. Potassium exchange behavior in Caribbean volcanic ash soils under banana cultivation. *Plant and Soil* 120:283-290. 1989.
18. GALINDO, G.; BINGHAM, F. T. Monovalent and heterovalent cation exchange equilibria in soils with variable charge. *Soil Science Society of America Journal* 41:883-886. 1977.
19. GOMEZ, C.; CARRILLO, I. F.; ESTRADA, G. Adsorción de potasio en Andosoles de la zona cafetera. *Cenicafé* 33(4): 104-128. 1982.
20. GRIMME, H. The dynamics of potassium in the soil-plant system. *In: POTASSIUM in the agricultural systems of the humid tropics*. Bangkok, International Potash Institute, 1985. p. 127 - 153.
21. GRISALES, F.; LESCOT, T. Guías para el mejoramiento y sostenimiento de la producción de plátano en la zona cafetera central. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 188:1-8. 1993.
22. HENAO, M. C. Dinámica y disponibilidad del magnesio en dos suelos de la zona cafetera central. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía, 1995. 180 p. (Tesis: Magister en Suelos).
23. HERBILLON, A. J. Chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizons of low activity clay soils. *International Soil Classification Workshop*, 8. 1988. 16 p.
24. LAHAV, E. Banana nutrition. *In: GROVENS, S. ed. Bananas and plantains*. London, Chapman and Hall, 1995. p. 230-257.
25. MALAGON, D.; PULIDO, C.; LLINAS, R. Génesis y taxonomía de los Andisoles colombianos. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1991. 118 p.
26. MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *In: CLAY Conference, Clay and Clay Minerals 7*. New York, 1960. Proceedings. p. 317-327.
27. MIZOTA, C.; VAN REEUWIJK, L. P. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. Wageningen, ISRIC, 1989. 186 p. (Soil Monograph No. 2).
28. OKAMURA, Y.; WADA, K. Ammonium-calcium exchange equilibria in soils and weathered pumices that differ in cation exchange materials. *Journal of Soil Science* 35:387-396. 1984.
29. PARFITT, R. L. Potassium-calcium exchange in some New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Research* 30:145-158. 1992.
30. PARFITT, R. L.; WILSON, A. D. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. *In: FERNANDEZ C., E.; YAALON, D. H. eds. Catena Supplement* 7:1-8. 1985.
31. PERROT, K. W. Effects of pH and aluminosilicate composition on K-Mg exchange selectivity of amorphous aluminosilicates. *Geoderma* 26:311-322. 1981.
32. ROUILLER, J.; BURTIN, G.; SOUCHIER, B. La dispersion des sols dans l'analyse granulométrique. Méthode utilisant les résines échangeuses d'ions. *Bulletin ENSAIA Nancy* 14:193-205. 1972.
33. SCHACHTSCHABEL, P. Untersuchung über die sorption der tonmineralien und organischen bodenkolloide, und die bestimmung des anteils dieser kolloide and der sorption in boden. *Kolloide-Beihefte* 51:199-276. 1940.
34. SCHALSCHA, E. B.; PRATT, P. F.; ANDRADE, L. DE. Potassium-calcium exchange equilibria in volcanic ash soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 39:1069-1076. 1975.
35. SCHUPPLI, P. A.; ROSS, G. J.; McKEAGUE, J. A. The effective removal of suspended materials from pyrophosphate extracts of soils from tropical and temperate regions. *Soil Science Society of America Journal* 47:1026-1036. 1983.
36. SOIL SURVEY STAFF. *Keys to Soil Taxonomy*. 6. ed. Washington, Department of Agricultura, 1994. 306 p.
37. VAN REEUWIJK, L. P.; DEVILLIERS, J. M. Potassium fixation by amorphous aluminosilicate gels. *Soil Science Society of America Proceedings* 32:238-240. 1968.