



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,
A.C.
México

Borges-Gómez, Lizette; Escamilla-Bencomo, Armando; Soria-Fregoso, Manuel; Casanova-Villareal, Víctor

Potasio en suelos de Yucatán

Terra Latinoamericana, vol. 23, núm. 4, octubre-diciembre, 2005, pp. 437-445

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311146002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

POTASIO EN SUELOS DE YUCATÁN

Potassium in Soils of Yucatán

Lizette Borges-Gómez^{1‡}, Armando Escamilla-Bencomo¹, Manuel Soria-Fregoso² y Víctor Casanova-Villareal²

RESUMEN

Los suelos de Yucatán, México, muestran una amplia gama de expresiones morfológicas, debido a la diversidad de los materiales de origen y a las condiciones climáticas y topográficas de la entidad. Se han reconocido 20 zonas fisiográficas con una gran variedad de suelos, sin embargo, su conocimiento físico y químico ha sido muy general, ya que se ha considerado el espacio que ocupa como una superficie homogénea. Dado que la disponibilidad de K depende de su contenido en la solución del suelo, del adsorbido a los coloides del suelo, de la capacidad del suelo para mantener una concentración de K en solución y de su difusión a través de la solución del suelo, en este trabajo se evaluaron las fracciones soluble (Ks), intercambiable (Ki), el poder amortiguador (b') y la difusión efectiva (D_e) del K en 16 suelos con potencial agrícola. Los resultados se correlacionaron con el porcentaje de arcilla, la materia orgánica (MO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), Ca y Mg. Los resultados mostraron diferencias ($P < 0.0001$) entre los suelos en Ks, Ki, D_e y b' . Una relación bastante pobre ($r^2 = 0.6$) existe entre Ki y Ks. Ninguna variable mostró relación con la MO y CIC; suelos con contenidos menores que $1.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Ki presentaron relación negativa con Ca y Mg ($r^2 = 0.74$). Los suelos con alto porcentaje de arcilla ($\geq 25\%$) estuvieron relacionados con Ki ($r^2 = 0.9$), sin embargo, no se encontró relación de D_e y b' con el contenido de arcilla, por lo que un siguiente estudio podría estar dirigido a la identificación de minerales que expliquen estas diferencias.

Palabras clave: *potasio soluble e intercambiable, coeficiente de difusión, poder amortiguador.*

SUMMARY

The soils of Yucatan exhibit a wide range of morphological expressions due to the diversity of original materials and to the climatic and topographical conditions of the area. Twenty physiographical areas have been recognized with a great variety of soils. However, information on the physical and chemical aspects of the soil is rather general, since the space it occupies has been regarded as a homogenous surface. Given the fact that K availability depends on the content of soil solution, the amount adsorbed to the colloids, the capacity to maintain a K concentration in solution and its diffusion throughout the soil solution, this work evaluated the fractions of soluble K (Ks), exchangeable (Ki), the buffer power (b'), and the effective diffusion (D_e) in 16 soils with agricultural potential. The results were correlated with the percentage of clay, organic matter (OM), cationic exchange capacity (CEC), Ca, and Mg. The results showed differences ($P < 0.0001$) in Ks, Ki, D_e , and b' . A poor relationship ($r^2 = 0.6$) was found between Ki and Ks. None of these showed a relationship with OM and CEC; soils with contents lower than $1.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ Ki presented a negative relationship with Ca and Mg ($r^2 = 0.74$). The soils with a high percentage of clay ($\geq 25\%$) showed a better relationship with Ki ($r^2 = 0.9$); however, no relationship was registered for D_e and b' with the percentage of clay, therefore a subsequent study could focus on the identification of minerals which might explain these differences.

Index words: *soluble and exchangeable potassium, coefficient of diffusion, buffer power.*

INTRODUCCIÓN

El potasio es un elemento esencial, tanto en los animales, como en las plantas. Los requerimientos por las plantas lo ubican en el quinto lugar después del C, O, H y N (Marschner, 1995). En la corteza terrestre, el K es de los elementos más predominantes y

¹ Centro de Investigación Científica de Yucatán. Calle 43 No. 130, Col. Chuburna de Hidalgo, 97200 Mérida, Yucatán, México.

[‡] Autor responsable (lizette_borges@hotmail.com)

² Instituto Tecnológico Agropecuario de Conkal. km 16.3 antigua carr. Mérida-Motul, Yucatán, México.

su concentración en la litósfera es en promedio de 2.6% (Sparks y Huang, 1985). La mayor parte del K disponible para las plantas es de origen inorgánico, ya que se forma a través del intemperismo de las rocas, por esto, en suelos orgánicos es posible encontrar el contenido más bajo de K ($< 0.03\%$).

En el suelo, el K se clasifica en cuatro categorías: i) presente en la solución del suelo, ii) intercambiable, iii) difícilmente intercambiable y iv) formando parte de los minerales del suelo (Barber, 1984). La disponibilidad de nutrientes del suelo para las plantas depende, principalmente, de la cantidad y naturaleza en la solución del suelo y de su asociación con los nutrientes adsorbidos o contenidos en la fase sólida del mismo (Comerford, 1999; Cox *et al.*, 1999). A medida que el cultivo remueve el K de la solución del suelo, el K intercambiable se libera y reponer el K de la solución del suelo. De esta forma, por medio de los procesos de intercambio catiónico, el K está continuamente disponible para el crecimiento de las plantas; esto ocurre sólo si el suelo contiene suficiente K (Wild, 1989). La adsorción de K en las superficies de intercambio y su disponibilidad dependen de las características físico-químicas del suelo.

Yucatán se caracteriza por una diversidad edáfica, en la cual predominan los suelos del tipo Leptosoles, Rendzinas y Cambisoles, ubicados en la región centro y norte del estado. Estos suelos son someros, de colores que van del rojo al negro, pasando por diversas tonalidades de café con abundante contenido de piedras y frecuentes afloramientos de coraza calcárea. Hacia el sur y oriente del estado, se encuentran los suelos profundos (Luvisoles, Nitosoles, Vertisoles y Gleysoles), libres de afloramientos rocosos y piedras. Otros suelos son los asociados geográficamente con el litoral marino (Regosoles, Histosoles y Solonchács), los cuales se caracterizan por ser profundos, sin rocas, de color ligeramente amarillento o grisáceo, y con textura arenosa (Wilson, 1980; Duch, 1988).

Desde el punto de vista agrícola, el conocimiento de las características físicas y químicas de los suelos de Yucatán, para un mejor aprovechamiento, es muy general. A pesar de la importancia del K en la nutrición de los cultivos, las formas y el contenido de este mineral se han estudiado pobremente en los suelos de Yucatán. En general, la forma analizada ha sido el K intercambiable y, para algunos sitios, se han reportado contenidos de 0.1 a 2.2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Duch, 1988; Weisbach *et al.*, 2002; Bautista-Zúñiga

et al., 2003). No obstante que la forma de K inmediatamente disponible para la planta es la presente en la solución del suelo, no existe un documento serio que mencione las condiciones que prevalecen para los diferentes suelos de Yucatán.

El análisis de la disponibilidad de K para las plantas requiere de estimar el movimiento del nutriente en la solución, desde la superficie de las partículas de la cual se libera hasta las inmediaciones de la raíz. El movimiento de los nutrientes ocurre por difusión o flujo de masas y es obvio que el contenido de agua está muy relacionado con el abastecimiento del nutriente. Las aplicaciones de las leyes de Darcy y de Fick permiten estimar el movimiento de nutrientes producidos por el flujo de la transpiración y por los gradientes de difusión establecidos entre la superficie de la raíz y la solución global del suelo (Comerford, 1999). Por otra parte, al removerse los nutrientes de la solución del suelo, ya sea por lixiviación o por captación de la planta, un suelo fértil debe tener la capacidad para reponer lo que se ha removido de la solución. Esta capacidad está descrita por el poder amortiguador del suelo (b'), el cual se refiere a la capacidad de la fase sólida del suelo para mantener una concentración de K en la solución del suelo (Barber, 1984; Van Rees *et al.*, 1990a; Comerford, 1999; Tinker y Nye 2000). La evaluación del coeficiente efectivo de difusión (D_e) y del poder amortiguador (b') se ha utilizado para conocer la disponibilidad de nutrientes y en la aplicación de modelos matemáticos para predecir la absorción de nutrientes (Van Rees *et al.*, 1990b).

Entre los principales factores que afectan la distribución de K entre la fase sólida y líquida del suelo, se encuentran el contenido y tipo de arcilla (Barber, 1984). Esto se debe a que las fuerzas con que el K es retenido varían con el tipo de arcilla y la posición del ion en la misma. Cuando más débil esté el K retenido en la superficie de las arcillas, más fácil podrá ser liberado a la solución del suelo.

Con lo anterior descrito, el presente trabajo de investigación se realizó con los objetivos de: i) hacer una revisión del contenido de K soluble y su relación con el K intercambiable en 16 suelo de Yucatán, ii) relacionar el contenido de K con características del suelo que participan en el complejo de intercambio, y iii) evaluar el poder amortiguador y la difusión efectiva del K a través de la solución del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con los límites naturales y políticos reconocidos, el estado de Yucatán se localiza entre 19° 40' y 21° 37' N y entre 87° 30' y 90° 26' O. Dentro de estos límites se eligieron 16 suelos con potencial productivo con base en la zonificación edáfica y fisiográfica del estado (Duch, 1988; 1991). Cada sitio se georeferenció utilizando un GPS MAGALLANES-300 (Cuadro 1).

El muestreo de suelo se realizó en una superficie promedio de 500 m². En cada sitio se recolectaron al rededor de 80 muestras simples, para formar tres

muestras compuestas. Las muestras se tomaron de la capa arable del suelo; en los suelos profundos la profundidad de muestreo fue de 0 a 30 cm, mientras que, en los suelos someros, la profundidad fue de 0 a 15 cm, o bien, hasta donde la presencia de las piedras lo permitió. En ningún caso el muestreo fue mayor que 30 cm de profundidad. Los suelos se secaron a la sombra y se tamizaron en un tamiz de 2 mm de diámetro. Para la caracterización de los suelos se evaluaron: pH, por el método potenciométrico, relación suelo/agua 1:2; textura, por el método del densímetro de Bouyoucos (Gee y Bauder, 1986); porcentaje de materia orgánica (MO), por el método

Cuadro 1. Clasificación y ubicación de los suelos estudiados en el estado de Yucatán, México.

Suelo	Localidad	Ubicación	Coordenadas geográficas [†]	Clasificación EUA	Sistema FAO	Nomenclatura maya
1	Akil	km 1 carr. Akil-Tekax	20°14'49.74" 89°19'48"	Lithic Eutrochrepts	Cambisol crómico	K'ancab
2	Becanchen	km 3 carr. Becanchen-Nohalal	19°52'54" 89°13'22"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chaclu'um
3	Buctzotz	km 2 carr. Buctzotz- Temax	21°11'30" 88°46'43"	Lithic Eutrochrepts	Cambisol calcárico	K'ancab
4	Cacalchen	km 1.8 carr. Cacalchen-Mérida	20°59'10.43" 89°14'35.38"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chaclu'um
5	Celestún	km 15 carr. Kinchil-Mérida	20°51'33" 90°12'55"	Lithic Ustorthents	Leptosol	Chaltún
6	Chemax	km 15 transecto Chemax-Xcatzin	20°42'22" 87°52'28"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chaclu'um
7	El Cuyo	Ejido Sac-Bo	21°27'31" 87°38'44"	Lithic Rendolls	Rendzina	Pus-lu'um
8	Maxcanú	Carr. Maxcanu-Santo Domingo	20°34'42" 90°02'23"	Typic Ferrudalfs	Luvisol vértico	K'ancab
9	Peto	km 3 de la población de Xoy	20°08'3" 88°58'02"	Typic Ferrudalfs	Luvisol vértico	K'ancab
10	San Isidro	Ejido San Isidro municipio de Tekax	19°49'44" 89°25'05"	Typic Haplauderts	Vertisol pélico	Ya áx-hom
11	Tekit	Entronque carr Tekit-Mérida	20°31'48" 89°20'24"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chaclu'um
12	Telchac Pueblo	km 1.8 carr. Telchac Pblo-Telchac Pto.	21°13'8.1" 89°16'13.3"	Lithic Ustorthents	Leptosol	Tze'kel
13	Temozón	km 4 carr. Temozón-Calotmul	90°49'96" 88°11'34"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chaclu'um
14	Tizimin	km 10 carr. Tizimin- Buctzotz	21°8'54" 88°11'34"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chaclu'um
15	Tzucacab	km 5 del cruce con Becanchen	20°04'06" 89°06'14"	Typic Ferrudalfs	Luvisol vértico	Ya áx-hom
16	Xul	Ejido Xul, municipio de Oxkutzcab	20°4'14.4" 89°28'41.4"	Vertic Eutrochrepts	Cambisol calcárico	K'ancab

[†] En todos los casos, estas coordenadas corresponden a latitud norte (la primera) y longitud oeste (la segunda).

de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982); capacidad de intercambio catiónico (CIC), por el método de NH_4OAc ; y calcio y magnesio, extraídos con NH_4OAc 1 N pH 7, relación 1:20 (Grant y Thomas, 1982).

Se analizaron, en réplica de tres, las concentraciones de K intercambiable. Para ello, 20 mL de NH_4OAc 1 N pH 7 se añadieron a 1 g de suelo, la suspensión se agitó durante 10 min, por acción recíproca y, posteriormente, se centrifugó y se filtró. En el filtrado se cuantificó el contenido de K intercambiable (K_i). El análisis de K soluble en agua (K_s) se realizó en la solución de los suelos a capacidad de campo, por el método de centrifugación (Elkhatib *et al.*, 1987).

Las concentraciones de K_i y K_s se obtuvieron por espectroscopía de absorción atómica, con un equipo Perkin-Elmer, Modelo N9300141. Se utilizó una lámpara de cátodo hueco con una longitud de onda de 766.5 nm, la flama se obtuvo con la mezcla de aire y acetileno, y la sensibilidad de medición fue de 0.043 mg L^{-1} .

La movilidad de K en el suelo se evaluó a través del coeficiente efectivo de difusión (D_e), descrito por la ecuación (Nye, 1966; Olsen y Kemper, 1968):

$$D_e = D_L \theta f / b'$$

donde: D_L es el coeficiente efectivo de difusión de potasio en el agua, θ es el contenido de agua en el suelo, f es el factor de impedancia que toma en cuenta el trayecto tortuoso que sigue el ion, ocasionado por los poros del suelo, y b' es el poder amortiguador del suelo.

El contenido volumétrico de agua ($\theta = L^3 L^{-3}$) se obtuvo al evaluar el porcentaje de humedad del suelo a capacidad de campo y su relación con la densidad aparente del suelo (ρ) (Mg m^{-3}).

El poder amortiguador del suelo (b') está definido por Van Rees *et al.* (1990a) como:

$$b' = \theta + \rho K_d$$

donde: K_d está descrita por $\delta C_s / \delta C_l$, donde: C_s es la concentración (mmol kg^{-1}) de K en la fase sólida en equilibrio con C_l que es la concentración de K (mmol L^{-1}) en la fase líquida. Los valores de K_d se determinaron por la pendiente (C_s/C_l) de la isoterma de desorción lineal, usando el método de membranas de intercambio catiónico. Para ello, 1 g de suelo más

una membrana de intercambio catiónico se agitaron por tiempos (1, 5, 10, 20, 40, 60, 120, 180, 240 min) y, posteriormente, se cuantificaron el K removido por la membrana (C_s) y el K en equilibrio en la solución del suelo (C_l).

La distancia en que difunde el K en el suelo de un punto dado en un tiempo determinado se obtuvo de la ecuación (Tinker y Nye, 2000):

$$\text{Movilidad} = (2D_e t)^{1/2}$$

donde: D_e es el coeficiente de difusión efectiva ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$) y t es el tiempo (s).

Los resultados se analizaron estadísticamente mediante un análisis de varianza, utilizando el programa Statgraphic Plus, Versión 4.1 (Statgraphic, 1999). La comparación de medias por Tukey se realizó con un nivel de confianza de 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de los Suelos

Seis clases de suelos se identificaron de acuerdo con la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1994) y el Sistema FAO (DETENAL, 1974) (Cuadro 1). Los suelos predominantes se clasificaron como Lithic Rendolls (Rendzinas); en menor número los clasificados como Typic Ferrudalfs (Luvisol vértico), Lithic Eutrochrepts (Cambisol crómico y calcárico) y Lithic Ustorthents (Leptosol); y sólo se identificó un tipo de los suelos Vertic Eutrochrepts (Cambisol calcárico) y Typic Haplauderts (Vertisol pélico). Del mismo modo, de acuerdo con la nomenclatura maya, los suelos se agruparon en seis clases: los pertenecientes a la clase Chaclu'um y a la clase K'ancab fueron de mayor número, dos suelos del tipo Ya'ax-hom y sólo se identificaron un Chaltún, un Puslu'um y un Tzek'kel. Dado que la clasificación maya no considera las propiedades químicas del suelo y su clasificación se basa, principalmente, en características del paisaje, como son tipo de vegetación que sostiene, color, pedregosidad, profundidad, drenaje, relieve y pendiente (SARH, 1982), esta clasificación difiere de la Taxonomía EUA. No obstante, la clasificación maya está ampliamente difundida entre técnicos y campesinos de la península de Yucatán y se ha tomado como base en un gran número de estudios, por ello, en este estudio, se incluye dicha clasificación.

pH de los Suelos

Aunque los suelos de Yucatán se caracterizan por ser alcalinos o ligeramente alcalinos, cinco suelos mostraron un pH menor que 7 (Cuadro 2), uno de ellos tuvo un pH de 5.23 y coincidió con el contenido más bajo de Ca ($0.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Bertsch (1995), señaló que la aplicación intensiva de fertilizantes nitrogenados, como sulfato de amonio y nitrato de amonio, genera acidez residual a través de la formación disociada de H_2SO_4 y HNO_3 . Es probable que el pH bajo (5.23) del suelo ubicado en el ejido de San Isidro se deba al uso de este tipo de fertilizantes. El pH afecta la solubilización, disponibilidad y absorción de los nutrimentos; el valor óptimo se encuentra entre 6 y 6.5, por lo que los suelos con pH mayor o menor que el óptimo pueden presentar problemas de disponibilidad de nutrimentos.

Contenido de Potasio Soluble (Ks) e Intercambiable (Ki) del Suelo

Los contenidos de Ks y Ki fueron diferentes entre los sitios de estudio ($P < 0.0001$) (Cuadro 3). Esto se debe a que las fracciones de Ki dependen del material parental y su meteorización, así como del contenido y de la naturaleza de los coloides del suelo (Wang *et al.*, 2004). El menor contenido de Ki ($0.769 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) se encontró en el sitio Cacalchen, ubicado al norte de Yucatán, donde los suelos se caracterizan por ser

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas seleccionadas de los suelos de Yucatán, México.

Suelo [†]	pH	Arcilla	MO [‡]	CIC [§]	Ca	Mg
		---	%	---	cmol _c kg ⁻¹	---
1	7.32	18	5.1	36.7	17.3	2.55
2	7.44	37	5.6	39.9	44.15	1.35
3	7.19	14	10.5	52.8	28.0	2.7
4	7.0	11	12.8	55.9	36.7	1.45
5	7.24	9	16.1	58.6	52.1	3.8
6	7.24	14	7.9	43.7	23.45	1.95
7	7.53	17	9.7	45.2	47.85	1.85
8	6.23	25	3.8	31.9	9.75	2.1
9	6.59	43	3.6	29.8	9.25	1.35
10	5.23	24	3.4	26.4	0.1	1.05
11	7.19	15	5.9	40.5	15.2	2.55
12	7.25	13	10.1	44.2	27.3	1.35
13	7.10	34	6.7	39.1	19.35	1.45
14	6.74	19	6.6	34.3	11.7	3.0
15	6.29	49	2.3	29.1	8.51	2.15
16	7.01	27	4.2	28.6	8.05	0.8

[†] La clase de suelo y la localidad pueden verse en el Cuadro 1. [‡] Materia orgánica. [§] Capacidad de intercambio catiónico.

superficiales y pedregosos. El contenido de Ki se incrementó hacia el sur, donde los suelos son más profundos. Por ejemplo, el suelo de Tzucacab (Luvisol vértico) presentó el mayor contenido de Ki ($3.015 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$); alto contenido de Ki se ha reportado en Luvisoles y Vertisoles de España (Jiménez y Parra, 1991; Roca-Jove y Vallejo-Calzada, 2000).

De acuerdo con Duch (1988), los materiales que forman el sustrato geológico del estado son, en su mayoría, formaciones terciarias y, en menor medida, cuaternarias con diferentes tiempos de meteorización, aumentando la edad geológica del material hacia el sur del estado. Esto explica la diferencia de concentración de K: los suelos superficiales son los más jóvenes y con menor contenido de K, mientras que los suelos profundos del sur son los de mayor tiempo de formación y mayor contenido de K. No obstante, por su contenido intercambiable (mayor que $0.6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) todos los suelos podrían clasificarse como ricos en K, sin embargo, éste no es del todo aprovechado por las plantas (Wang *et al.*, 2004). Comerford (1999) describe que la habilidad de un suelo para proporcionar nutrimentos ocurre a través de los mecanismos de i) liberación de nutrimentos de la fase sólida del suelo y ii) movimientos de los nutrimentos, a través de la solución del suelo, hacia las raíces para que ocurra la absorción. Por lo tanto, en un suelo fértil debe considerarse al “estatus suelo-planta”.

Cuadro 3. Contenido de K intercambiable y soluble en suelos del estado de Yucatán, México.

Suelo	K _{sol}	ES [†]	K _{int}	ES [†]
	mM		cmol _c kg ⁻¹	
1	0.069 fgh	0.005	0.997 g	0.006
2	0.358 e	0.007	2.405 c	0.053
3	0.072 fgh	0.002	0.996 g	0.005
4	0.020 h	0.001	0.769 i	0.016
5	0.673 cd	0.017	2.345 c	0.019
6	0.196 f	0.003	0.911 h	0.012
7	0.155 fgh	0.002	1.640 e	0.039
8	0.782 c	0.005	1.865 d	0.004
9	0.915 b	0.017	2.490 b	0.029
10	0.734 c	0.021	1.171 f	0.008
11	0.064 gh	0.005	1.199 f	0.014
12	0.023 h	0.003	0.878 h	0.004
13	0.593 d	0.020	2.384 c	0.004
14	0.100 fgh	0.013	1.022 g	0.007
15	2.350 a	0.175	3.015 a	0.042
16	0.328 e	0.020	1.216 f	0.015

Cifras con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales ($n = 3$). [†] Error estándar.

De manera similar a lo observado con el contenido de K_i , los contenidos más bajos de K_s se encontraron en el norte de Yucatán, en la zona de Leptosoles y Rendzinas (Telchac Pueblo 0.023 mM, Cacalchen 0.020 mM y Buctzotz 0.072 mM); estos suelos, además de ser limitados en profundidad por la presencia de roca dura o material calcáreo, tienen un drenaje muy rápido, lo que ocasiona filtraciones de K a capas más profundas y disminuye el contenido de K_s en la capa superficial del suelo (Peniche, 1994).

No siempre los suelos con alto contenido de K intercambiable tienen un alto contenido de K_s ; esto se aprecia en suelos como Tzucacab y Becanchen, ambos con alto contenido de K_i , sin embargo, sólo Tzucacab reportó un alto valor de K_s (2.35 mM), no así Becanchen, donde sólo la fracción intercambiable tuvo una alta concentración ($2.41 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) y no el K_s , cuyo contenido fue de 0.358 mM. Esto explica la pobre relación ($r^2 = 0.6011$) existente entre K_i y K_s .

Relaciones del K con el Porcentaje de Arcilla, Calcio y Magnesio

Una relación negativa entre K_i y Ca ($K_i = -63.26 \text{ (Ca)} + 83.024$, $r^2 = 0.7377$) se observó en suelos con contenido menor que $1.22 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K (Suelos 1, 3, 4, 6, 10, 11, 12, 14 y 16). Esto puede deberse a la presencia de sitios más selectivos para K en estos suelos. Evangelou y Lumbanraja (2002) demostraron que la selectividad en el intercambio de cationes depende del número y tipo de cationes presentes. Appel *et al.* (2003) evaluaron el coeficiente de selectividad de diferentes proporciones de K/Ca en Oxisoles y Ultisoles y reportaron una preferencia del ion K sobre el Ca, atribuyéndose esto, a la abundancia de caolinita, la cual se caracteriza por su alta selectividad por el ion K debido a su alta densidad de carga y baja energía de hidratación por el K. Por su parte, Dufey y Delvaux (1989) señalaron que se ha reconocido una alta heterogeneidad de sitios de adsorción de K en suelos arcillosos y, en las reacciones de intercambio entre K y otro catión mayoritario como el Ca, la selectividad de K decrece en relación con el Ca, debido a que el ion K se acumula inicialmente en la mayoría de los sitios selectivos. Los suelos en los cuales no hubo relación entre el contenido de K_i y los contenidos de Ca y Mg fueron, en general, aquellos que presentaron los mayores porcentajes de arcilla (Suelos 2, 8, 9, 13 y 15); es probable una menor proporción de arcillas selectivas por el ion K en estos suelos, por lo que

el alto contenido de K_i estuvo más bien relacionado con la cantidad de arcilla que con el tipo de arcilla presente ($K_i = 0.0432 \text{ (%arcilla)} + 0.8094$, $r^2 = 0.92$). Los Suelos 5 (Chaltún) y 7 (Puslu'um) no presentaron relación con Ca y Mg, ni con el contenido de arcilla; esto se atribuye a las características propias de estos tipos de suelo, ambos pertenecientes al litoral marino, ricos en materia orgánica. El suelo Chaltún se caracteriza por su continua roca que aflora y el Puslu'um por ser tierra suelta con piedras (SARH, 1982).

Difusión Efectiva (D_e) de Potasio en el Suelo

Una diferencia significativa ($P < 0.0001$) en la difusión de K se encontró cuando los suelos se llevaron a capacidad de campo (Cuadro 4). Estas diferencias se deben a que en arcillas minerales 1:1, como la caolinita, los cationes intercambiables se encuentran adsorbidos sobre la superficie externa de los cristales y pueden moverse en forma libre sobre éstos. En arcillas minerales 2:1, como la montmorillonita, algunos cationes se encuentran en la superficie y una cantidad importante se encuentra entre las láminas de aluminosilicatos y, por lo tanto, la movilidad depende de la expansión de las láminas y del espesor de agua entre éstas (Tinker y Nye, 2000). Es probable que en suelos como Becanchen, la difusión de K es mayor debido a una mayor proporción de arcillas 1:1. El tipo de arcilla

Cuadro 4. Coeficiente de difusión efectiva (D_e) y poder amortiguador del suelo (b') en suelos de Yucatán, México.

Suelo	D_e $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$	ES [†]	b'	ES [†]
1	9.9×10^{-8} f	1.4×10^{-8}	77.3 b	1.15
2	1.8×10^{-6} a	6.2×10^{-8}	32.9 efg	0.76
3	9.4×10^{-7} c	7.4×10^{-8}	26.5 ghi	1.29
4	7.4×10^{-8} f	1.1×10^{-8}	58.2 cd	3.63
5	1.5×10^{-6} b	8.1×10^{-8}	23.5 ghi	1.41
6	9.5×10^{-7} c	7.6×10^{-8}	28.8 fg	2.49
7	4.6×10^{-7} de	2.5×10^{-8}	32.5 efg	1.62
8	6.6×10^{-7} d	3.0×10^{-8}	17.4 hi	0.83
9	2.3×10^{-7} ef	1.4×10^{-8}	121.6 a	8.25
10	7.1×10^{-7} cd	8.3×10^{-8}	14.2 i	0.50
11	1.5×10^{-7} f	2.4×10^{-8}	34.9 efg	2.15
12	5.9×10^{-8} f	5.9×10^{-8}	62.1 c	0.43
13	9.3×10^{-7} c	2.4×10^{-8}	31.6 efg	0.65
14	7.6×10^{-7} c	6.6×10^{-8}	42.4 ef	4.89
15	8.4×10^{-7} c	1.2×10^{-8}	28.1 fghi	0.42
16	5.9×10^{-7} d	2.4×10^{-8}	45.9 de	0.79

Cifras con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales. $n = 3$. [†] ES = error estándar.

predominante en Yucatán se ha estudiado poco debido a la dificultad del análisis ocasionado por su alto contenido de carbonatos de calcio (Duch, 1988) y de materia orgánica (entre 50 y 150 g kg⁻¹ de C) (Shang y Tiessen, 2003). Sin embargo, en suelos del norte, se ha reportado la presencia de caolinita y, en áreas con alta precipitación o donde el drenaje es pobre, la presencia de montmorillonita (Wilson, 1980) también se ha identificado en suelos Chaclum la presencia de halloisita, boehmita, cuarzo, hematita, calcita e illita (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003).

El coeficiente de difusión de K en el agua (D_L) es de 1.9×10^{-5} cm² s⁻¹ y es un valor constante, mientras que los valores de D_e del K en el suelo, en general, se encuentran entre 1×10^{-6} y 1×10^{-7} cm² s⁻¹ (Barber, 1984), dentro de este rango estuvieron 13 de los 16 suelos estudiados. En los suelos de Akil, Cacalchen y Telchac Pueblo, la difusión de K fue menor (9.9×10^{-8} , 9.4×10^{-8} y 6.9×10^{-8} cm² s⁻¹, respectivamente). En arcillas no hidratadas, como por ejemplo la illita, los valores de D_e pueden ser tan bajos como 1×10^{-23} cm² s⁻¹ (Tinker y Nye, 2000). Esto sugiere que mientras más arcillas de este tipo contenga el suelo, la difusión de K será menor.

El poder amortiguador (b') fue diferente en los suelos ($P < 0.0001$) y no mostró relación con el porcentaje de arcilla. Mengel y Busch (1982) ya han señalado esto con anterioridad y es evidente la presencia de diferentes tipos de minerales en el suelo. Por lo tanto, el siguiente estudio puede estar dirigido a la identificación de los minerales que explique cuáles

son las arcillas predominantes en estos suelos y cuál es el efecto de éstas sobre la capacidad del suelo para mantener una concentración de K en la solución del suelo y el desplazamiento de K a través de la solución del suelo. El suelo que mostró la menor capacidad para mantener una concentración de K en solución fue el de Peto ($b' = 121$).

En promedio, el desplazamiento de K en la solución del suelo fue de 0.3 cm d⁻¹ (Figura 1); en un intervalo de 0.1 a 0.55 cm d⁻¹ en los suelos de Telchac Pueblo y Becanchen, respectivamente, lo que indica que el K de Becanchen se mueve aproximadamente seis veces más rápido que el K del suelo de Telchac Pueblo.

CONCLUSIONES

- El mayor contenido de K soluble y K intercambiable se presenta en los suelos profundos ubicados al sur del estado y la concentración de ambas fracciones disminuye en el norte; los de menor contenido son los suelos someros, Leptosoles y Rendzinas.
- Con excepción del sitio Tzacacab, los contenidos de K soluble son bajos; los menores contenidos se presentaron en Telchac Pueblo, Cacalchen y Buctzotz.
- Una relación muy pobre existe entre el K intercambiable y el K soluble del suelo, por lo que la disponibilidad de K para los cultivos puede estar mejor descrita por el poder amortiguador del suelo (b') y el coeficiente efectivo de difusión (D_e).

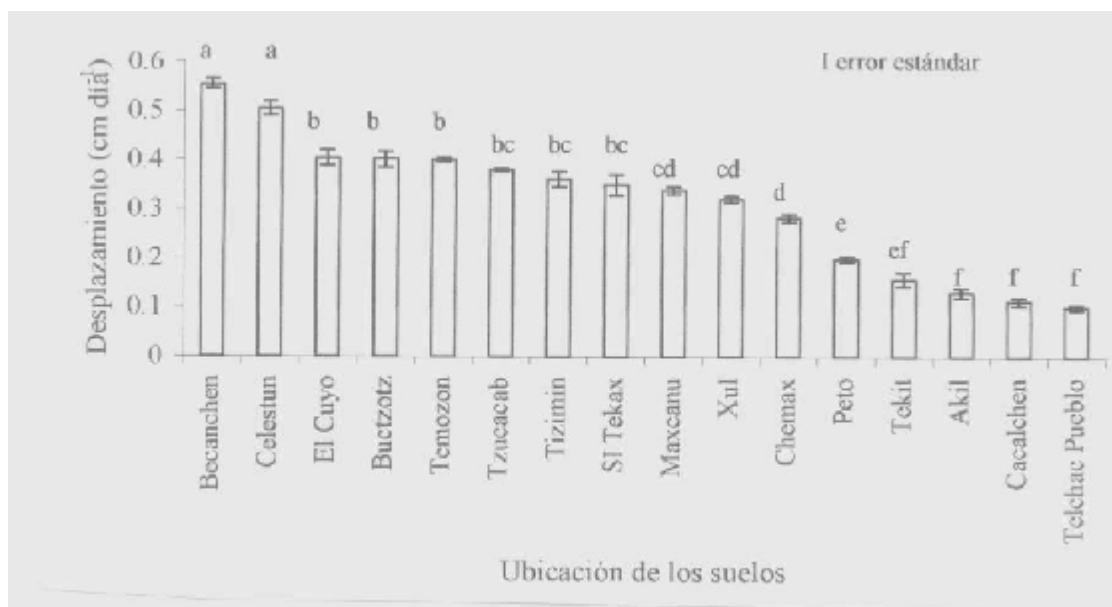


Figura 1. Desplazamiento de potasio en la solución de los suelos de Yucatán a capacidad de campo.

- El suelo de San Isidro es de mayor capacidad para mantener una concentración de K en la solución del suelo, pero el que muestra una mayor coeficiente de difusión efectiva es el de Becanchen
 - Los valores de b' y D_e no estuvieron relacionados con el porcentaje de arcilla, por lo que un segundo estudio, en el que se identifiquen los tipos de minerales presentes en el suelo, podría explicar las diferencias de los valores de b' y D_e entre los suelos.

LITERATURA CITADA

- Appel, C., L.Q. Ma, R.D. Rhue y W. Reve. 2003. Selectivities of potassium-calcium and potassium-lead exchange in two tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1707-1714.
- Barber, S.A. 1984. Soil nutrient bioavailability. John Wiley. New York.
- Bautista-Zúñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu y R. Lozano. 2003. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra* 21: 1-11.
- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Instituto Tecnológico de San Carlos-Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica.
- Comerford, N. 1999. Mecanismos de captación de nutrimentos en ecosistemas forestales: de cómo interpretar la fertilidad en el contexto de la conservación de recursos genéticos. pp. 127-135. *In: Orellana, R., A. Escamilla y A. Larqué (eds.). Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos.* Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Cox, A.E., B.C. Joern, S.M. Brouder y D. Gao. 1999. Plant available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 902-911.
- DETENAL. Dirección de Estadística del Territorio Nacional. 1974. Sistema de clasificación de suelos FAO/UNESCO. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F.
- Duch, G.J. 1988. La conformación territorial del estado de Yucatán. Universidad Autónoma Chapingo-Centro Regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México.
- Duch, G.J. 1991. Fisiografía del estado de Yucatán. Su relación con la agricultura. Universidad Autónoma Chapingo-Centro Regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México.
- Dufey, J.E. y B. Delvaux. 1989. Modeling potassium-calcium exchange isotherms in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1297-1299.
- Elkhatib, E.A., J.L. Hern y T.E. Staley. 1987. A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 578-583.
- Evangelou, V.P. y J. Lumbanraja. 2002. Amonium-potassium-calcium exchange on vermiculite and hydroxy-aluminum vermiculite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 445-455.
- Gee, G.W. y J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. pp. 383-409. *In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* Agronomy 9. 2nd ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Jiménez, C. y M.A. Parra. 1991. Potassium quantity-intensity relationships in calcareous vertisol and inceptisols of southwestern Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 985-989.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. London, UK.
- Mengel, K. y R. Busch 1982. The importance of the potassium buffer power on the critical potassium level in soils. *Soil Sci.* 133: 27-32.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539-547. *In: Page, A.L., R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* Agronomy 9. 2nd ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Nye, P.H. 1966. The measurement and mechanism of ion diffusion in soil. I. The relation between self-diffusion and bulk diffusion. *J. Soil Sci.* 17: 16-23.
- Olsen, S.R. y W.D. Kemper. 1968. Movement of nutrient to plant roots. *Adv. Agron.* 20: 91-151.
- Peniche, N. 1994. Riesgos y oportunidades para el campo yucateco. Gobierno del estado de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Roca-Jove, M.C. y V.R. Vallejo-Calzada. 2000. Predicting radiocaesium root uptake based on potassium uptake parameters. A mechanistic approach. *Plant Soil* 222: 35-49.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1982. Los suelos de la Península de Yucatán. Subdirección de Planeación. Dirección General de Estudios. Subdirección de Agrología. México, D.F.
- Shang, C. y H. Tiessen. 2003. Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. *Biochemistry* 62: 177-196.
- Soil Survey Staff. 1994. Claves para la Taxonomía de Suelos. Trad. al español por C.A. Ortiz-Solorio y Ma. del C. Gutiérrez-Castoreña. Publicación Especial 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Sparks, D.L. y P.M. Huang, 1985. Physical chemistry of soil potassium. pp. 202-265. *In: Mundson, R.D. (ed.). Potassium in agriculture.* American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Statgraphic. 1999. Statgraphic Plus. Version 4.1. Statistics software for Microsoft Excel. Madison, WI.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. pp. 159-164. *In: Page, A.L., R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* Agronomy 9. 2nd ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Tinker, P.B. y P.H. Nye. 2000. Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press. New York.
- Van Rees, K.C.J., N.B. Comerford y P.S.C. Rao. 1990a. Defining soil buffer power: implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1505-1507.
- Van Rees, K.C.J., N.B. Comerford y W.W. McFee. 1990b. Modeling potassium uptake by slash pine seedlings from low-potassium-supplying soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1413-1421.
- Wang, J.J., D.L. Harrel y P.F. Bell. 2004. Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 654-661.

Weisbach, C., H. Tiessen y J. Jimenez-Osornio. 2002. Soil fertility during shifting cultivation in the tropical karst soil of Yucatan. *Agronomie* 22: 253-263.

Wild, A. 1989. Potasio, sodio, calcio, magnesio, azufre y silicio. pp. 783-818. *In*: Wild, A. (ed.). Condiciones del suelo y

desarrollo de las plantas según Russell. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Wilson, E.M. 1980. Physical geography of the Yucatan peninsula. pp. 5-40. *In*: Moseley, E.H. y E.D. Terry (eds.). Yucatan a world apart. University of Alabama. Tuscaloosa, AL.