

# EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN CON POTASIO EN UN VERTISOL SOBRE LA RELACIÓN CANTIDAD/INTENSIDAD (Q/I)

## Effects of Potassium Application in Vertisols on Quantity/Intensity (Q/I) Relationships

Lamberto Zúñiga-Estrada<sup>1‡</sup>, José de Jesús Martínez-Hernández<sup>2</sup>, Gustavo Adolfo Baca-Castillo<sup>2</sup>, Ángel Martínez-Garza<sup>2†</sup>, Juan Luis Tirado-Torres<sup>2</sup>, Josué Kohashi-Shibata<sup>2</sup> y Jaime Cruz-Díaz<sup>2</sup>

### RESUMEN

Para entender el comportamiento del K aplicado como fertilizante en el sistema suelo-planta, en la presente investigación se evaluó, en laboratorio, la habilidad de un vertisol para suministrar K a la solución del suelo, nutrimento relativamente inmóvil. Se realizaron análisis químicos para conocer el efecto del fertilizante aplicado sobre el comportamiento del K intercambiable y soluble. En cinco tratamientos se aplicó 0, 62, 125, 375 y 750 mg K kg<sup>-1</sup> suelo; como fuente de K se utilizó KCl grado reactivo (Merck®). El suelo tratado se depositó en frascos de vidrio y se humedeció a capacidad de campo, con agua destilada; las muestras de suelo se incubaron 32 d a 32 °C, en una estufa de aire forzado. Terminada la incubación, se determinó el K intercambiable, con AcONH<sub>4</sub> 1N; el K soluble se extrajo con CaCl<sub>2</sub> 0.01M y se estimaron los valores de los parámetros generados en las curvas cantidad-intensidad (Q/I). El K intercambiable varió de 0.37 a 0.76 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup> y el soluble de 0.08 a 0.23 meq L<sup>-1</sup> en los tratamientos que recibieron 0 y 750 mg K kg<sup>-1</sup> suelo. Los valores de la actividad iónica del K (AR<sup>o</sup><sub>K</sub>) que representa el K en solución, se incrementaron con la fertilización potásica: de 0.0004 a 0.0017 (mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup>, en los tratamientos 0 y 750 mg K kg<sup>-1</sup> suelo. Los valores del AR<sup>o</sup><sub>K</sub>, determinados en los tratamientos que recibieron 125, 375, y 750 mg K kg<sup>-1</sup>, sugieren que el K puede abastecer adecuadamente las necesidades de las plantas, pero es necesario realizar aplicaciones periódicas de fertilizantes potásicos para mantenerlo constante

en solución. Los valores de K intercambiable presentaron correlación (R = 0.85) con los valores de AR<sup>o</sup><sub>K</sub>.

**Palabras clave:** K intercambiable, K soluble, parámetros de cantidad/intensidad.

### SUMMARY

In order to understand the dynamics of K fertilizer in the soil-plant system under laboratory conditions, the present study focused on the ability of a Vertisol to supply K to the soil solution because K is considered a relatively immobile element in the soil. Chemical analyses were performed to determine the effects of fertilizers on the behavior of soluble and exchangeable K. Five treatments with 0, 62, 125, 375 and 750 mg K kg<sup>-1</sup> soil were used and, as a K source, KCl grade reagent was used (Merck®). The treated soils were placed in glass beakers, and soil moisture was maintained at field capacity with distilled water, then incubated at 32 °C for 20 days in a forced air oven. In the treated incubated soils, exchangeable K was determined with AcONH<sub>4</sub> 1N; soluble K was extracted with CaCl<sub>2</sub> 0.01 M and the values of parameters generated on the quantity/intensity (Q/I) curve were estimated. In the treatments 0 and 750 mg de K kg of soil, exchangeable K ranged from 0.37 to 0.76 cmol(+) kg<sup>-1</sup> and soluble K from 0.08 to 0.23 meq L<sup>-1</sup> respectively. The K ionic radius activity values (AR<sup>o</sup><sub>K</sub>), which represents K in the soil solutions, increased with K fertilization, from 0.0004 to 0.0017 (mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup> in the 0 and 750 mg K kg<sup>-1</sup> treatments, respectively. The magnitude of AR<sup>o</sup><sub>K</sub> (0.01 to 0.006 (mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup>) in the 125, 375 y 750 mg K kg<sup>-1</sup> treatments, suggest that the K adsorption is adequate for plant uptake but to maintain K constant in soil solutions periodical fertilization is needed. Exchangeable K values correlated (R = 0.85) with the AR<sup>o</sup><sub>K</sub> values.

<sup>1</sup> Campo Experimental Sur de Tamaulipas, INIFAP. 89601 Altamira, Tamaulipas, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (zuniga.lamberto@inifap.gob.mx)

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

**Index words:** *exchangeable K, soluble K, parameters of quantity-intensity.*

## INTRODUCCIÓN

El potasio es un nutrimento esencial para las plantas. Aproximadamente, 90% del K total que la planta absorbe accede a la raíz por difusión. La concentración de K varía entre 1 y 10 mg K kg<sup>-1</sup> suelo, y puede disminuir por tres razones: a) absorción de las plantas, b) lixiviación a capas inferiores (Havlin *et al.*, 1999); y c) fijación que presentan los minerales de arcillas 2:1 (Fassbender y Bornemisza, 1987). La reposición de este elemento a la solución del suelo es a partir del K intercambiable, retenido electrostáticamente por las cargas negativas que presentan la superficie y los bordes de las láminas de arcilla (Haby *et al.*, 1990).

La concentración de K intercambiable se modifica por la adición de fertilizante y se balancea por cambios en Ca y Mg intercambiables, los cuales se liberan a la solución del suelo y, por competencia iónica, disminuyen la eficiencia de los fertilizantes potásicos (Haby *et al.*, 1990). Esta eficiencia también es afectada por la fijación del K entre las capas de la arcilla, las condiciones de alternancia de humedecimiento y secado, pH alcalino o la presencia de iones fosfato (Fassbender y Bornemisza, 1987; Havlin *et al.*, 1999).

Con base en lo anterior, considerando que las formas de K en el suelo sufren cambios graduales en su concentración continuamente, entre 1 y 10 mg kg<sup>-1</sup> de suelo, la interpretación de la dinámica de este elemento implica considerar equilibrios de flujo que se explican con base en la termodinámica (Woodruff, 1955). Las reacciones químicas del suelo son controladas por la energía liberada ( $\Delta G$ ), cuando un equivalente de K es reemplazado en la arcilla por un equivalente de Ca (Woodruff, 1955); esta energía se obtiene mediante el potencial electroquímico ( $\mu_{\text{BEC}}$ ) (Evangelou *et al.*, 1994), y con las curvas cantidad/intensidad (Q/I), se calcula la diferencia en el potencial químico de un ion entre la fase sólida y la solución (Beckett, 1964).

En México, estudios del K con este enfoque fisicoquímico son escasos (Miehlich *et al.*, 1980; Etchevers *et al.*, 1991; Alvarado y Cruz, 1993; Cruz *et al.*, 1993). La mayoría de los estudios tiene un enfoque tradicional, donde se evalúa la respuesta de la planta al fertilizante potásico (Morazzani y Ortega, 1972) y el efecto de la aplicación de K en la dinámica del K soluble

(Ks), intercambiable (Ki), no intercambiable (Kni) y su capacidad amortiguadora (Bugarín *et al.*, 2007, Bolio-López *et al.*, 2008) o la disponibilidad y movimiento del K en sistemas de producción intensivos (Zamudio *et al.*, 2007). Con este enfoque tradicional, las respuestas favorables a la fertilización potásica representan sólo 5% de los estudios realizados (Morazzani y Ortega, 1972). Por lo que el incremento en el consumo de fertilizantes, en años recientes, se ha atribuido al agotamiento del reservorio de K en los suelos cultivados y a la respuesta favorable que los productores han observado en sus cultivos (Aguado-Lara *et al.*, 2002). Estudios para conocer el funcionamiento del K en el sistema suelo-planta que permitan mejorar la capacidad de diagnóstico y el manejo de la fertilización son necesarios (Aguado-Lara *et al.*, 2002).

Dada la trascendencia del enfoque tradicional del estado del K en los suelos y la necesidad de reposición de éste en los suelos de uso agrícola intensivo, para abastecer y mejorar el acceso y absorción de este nutrimento por las raíces de las plantas, es necesario estudiar este fenómeno sobre las bases del equilibrio entre la fase sólida- líquido y establecer la capacidad del suelo para suministrar K para las plantas. El objetivo del presente estudio fue establecer la dinámica del K en los suelos arcillosos de Tamaulipas, bajo el concepto de equilibrio cantidad-intensidad (Q/I), con el fin de generar información acerca del comportamiento del K natural en el suelo y el aplicado mediante fertilizantes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de Estudio

El estudio se realizó en un Vertisol (INEGI, 1988) del Campo Experimental Sur de Tamaulipas (CESTAM), localizado a 22° 35' N y 98° 10' O. La muestra de suelo se tomó a 0.30 m de profundidad, en 24 puntos del terreno seleccionados en zig-zag, y se formó una muestra compuesta con las 24 submuestras. En la muestra, secada a la sombra y tamizada (malla 2 mm), se determinó: tamaño de partícula (Bouyoucos, 1951); porcentaje de retención de humedad del suelo, a capacidad de campo (CC) y a punto de marchitez permanente (PMP), mediante la olla y membrana de presión (Richards, 1947 y Klute, 1986); materia orgánica (Walkley, 1947); capacidad de intercambio catiónico, por método de acetato de amonio (Jackson, 1976); bases

intercambiables, por acetato de amonio y determinado por flamometría (Jackson, 1976); y pH en agua, relación suelo: solución 1:2, (Jackson, 1976).

### Estudio de Incubación

En cinco frascos de vidrio de 130 mL de capacidad, se depositaron 100 g de suelo seco, se aplicaron por triplicado, 0, 62, 125, 375 y 750 mg K kg<sup>-1</sup> suelo, utilizando como fuente KCl grado reactivo (Merck®). La mezcla suelo-fertilizante se homogeneizó mediante agitación manual, se agregó agua destilada para llevar la humedad del suelo a CC y el frasco se cerró herméticamente. En seguida, los frascos con suelo y fertilizante se mantuvieron en incubación en una estufa de aire forzado, por 20 días, a 32 °C. Al término de este periodo de incubación, el suelo de los tratamientos se secó a la sombra y se tamizó (malla 2 mm); se evaluaron las bases intercambiables y solubles, así como los parámetros de la curva de la relación cantidad-intensidad (Q/I) para K.

### Bases Intercambiables y Solubles

Las bases intercambiables y solubles se extrajeron con NH<sub>4</sub>OAc, 1N, pH 7 (Jackson, 1976) y CaCl<sub>2</sub> 0.01 M (Houba *et al.*, 1986); el K se cuantificó por flamometría y el Ca y el Mg por complejometría (López y López, 1990). El valor de la concentración de las bases intercambiables y solubles se analizó con un diseño completamente al azar con tres repeticiones; los valores medios se compararon con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). La fracción fijada de potasio se considera como la diferencia entre el K aplicado y el no extraído.

### Parámetros de la curva Cantidad/Intensidad (Q/I)

La relación cantidad intensidad se determinó mediante el método de Goedert *et al.* (1975). Las muestras de suelo, de 0.2 a 0.3 g (de cada nivel de K estudiado), por duplicado, se colocaron en tubos de polipropileno para centrífuga, de 100 mL de capacidad.

Cincuenta mililitros de una solución de KCl (grado reactivo (Merck®), con una solución base de CaCl<sub>2</sub> 0.001M (Beckett, 1964), se agregó en cada tubo con suelo. Enseguida, el suelo se mantuvo en equilibrio con la solución durante 1 h, en un agitador de acción recíproca, se centrifugó a 2500 rpm por 15 min y se filtró con papel Whatman 40. En el sobrenadante se determinó K, Ca y Mg; la diferencia entre la concentración inicial de K y la concentración final de K, después de mantener el suelo en equilibrio con la solución de K, representó la cantidad de K ganado o perdido por el suelo ( $\pm \Delta K$ ). Los valores de  $\Delta K$  (cantidad) se graficaron contra los valores de la intensidad o relación de actividad del radio iónico del K ( $AR_K^\circ$ ), calculados mediante la fórmula  $AR_K^\circ = aK/(aCa + aMg)$  (mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup>, y se generó la curva característica cantidad/intensidad (Q/I), a partir de la cual se calcularon los valores de los parámetros:  $AR_K^\circ$ , que representa el K en solución (factor intensidad) KL, que constituye el K total intercambiable, unido a la superficie de la arcilla ( $\Delta K^\circ$ ) y los bordes ( $\Delta K_x$ );  $PBC_K$ , que indica la capacidad del suelo para mantener el K en solución (Sparks y Liebhart, 1981). El  $PBC_K$  se calculó de acuerdo con Fassbender y Bornemisza (1985).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cationes Intercambiables y Solubles

La concentración de cationes intercambiables y solubles, determinada en el suelo al inicio del estudio (Cuadro 1), se modificó con la aplicación de KCl (Cuadro 2). Al aumentar la dosis de K aplicado como fertilizante, el Ca y el K intercambiables se incrementaron en el suelo; esta tendencia se invirtió en la concentración de Mg. Las diferencias sólo fueron significativas para K, la mayor dosis de K aplicado incrementó 2.05 veces el K intercambiable, con relación al suelo que no recibió fertilizante. La misma tendencia ocurrió con el porcentaje de saturación de K en el suelo (Cuadro 2). El K intercambiable se incrementó debido

**Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso estudiado.**

Análisis mecánico			Humedad del suelo		pH (1:2)	MO	CIC	Cationes intercambiables			
Arena	Limo	Arcilla	CC	PMP				K	Ca	Mg	Na
----- % -----			-----			%	-----	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> -----			
26.90	23.00	50.10	42.64	20.6	8.70	1.10	52.53	0.37	43.20	4.40	1.35

CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

a que la solubilización del fertilizante potásico aplicado aumentó la concentración de este nutrimento en la solución del suelo, desplazando y compitiendo con otros cationes por las cargas negativas de la arcilla y de la materia orgánica. Lo anterior originó que en la solución del suelo se incrementara no sólo la concentración de K, sino también la de Ca y Mg, aumentando su disponibilidad para las plantas hasta 2.9, 2.5 y 2.0 veces más, respectivamente, con relación a la concentración de estos nutrimentos en la solución del suelo sin fertilizar (Cuadro 2); lo anterior demuestra que por efecto de la fertilización potásica, los cambios en los reservorios de K no ocurren en forma independiente, sino que están balanceados por cambios en la concentración de otros cationes, como lo indicó Schofield (1947).

No obstante que la arcilla predominante en el suelo estudiado es reportada como débil, con respecto a la fijación de K (Henríquez *et al.*, 1994), la mayor cantidad de K aplicado en el fertilizante no se cuantificó en los sitios de intercambio (Figura 1). Las condiciones de humedecimiento y secado a que se sometieron los tratamientos durante el periodo de incubación, permitieron que el K aplicado se fijara en sitios altamente específicos de la arcilla (Henríquez *et al.*, 1994).

El K no cuantificado en los sitios de intercambio representó 90% del K total aplicado al suelo, en el tratamiento con 375 mg K kg<sup>-1</sup> suelo. Este porcentaje disminuyó a 79%, cuando el suelo recibió 750 mg K kg<sup>-1</sup> suelo; valores altos, comparados con resultados de estudios con otros vertisoles, donde han encontrado valores del K no cuantificado en los sitios de intercambio de 56% (Henríquez *et al.*, 1994) y 36% (Bolio-Lopez *et al.*, 2008). La disminución en el porcentaje de K no cuantificado en los sitios de intercambio, cuando se aplicó la mayor dosis de K, pudo deberse a que la alta concentración de K en la solución del suelo desplazó

al Mg y el Ca, en este orden, de los sitios de intercambio a la solución del suelo (Cuadro 2), con lo cual se incrementó la cantidad de K retenido en los sitios de intercambio. Este K aplicado al suelo mediante fertilizantes, que no se determinó en la solución del suelo ni en los sitios de intercambio, no está disponible inmediatamente para las raíces de las plantas, pero constituye una reserva de K que puede ser liberada en los ciclos de cultivos posteriores (Blake *et al.*, 1999).

### Parámetros de la Curva Q/I

El fertilizante potásico aplicado al suelo modificó los valores de los parámetros determinados en las curvas cantidad/intensidad (Q/I). El AR<sup>o</sup><sub>K</sub>, que es el K en solución, incrementó su valor al aumentar la dosis de K aplicado; el valor de AR<sup>o</sup><sub>K</sub> determinado en el suelo sin fertilizar, fue superado cuatro veces cuando se aplicaron 750 mg K kg<sup>-1</sup> suelo (Cuadro 3). El incremento en el valor del K en solución AR<sup>o</sup><sub>K</sub>, originado por la aplicación de fertilizante, había sido previamente reportado (Sparks y Liebhardt, 1981; Conti, 2002). Aun cuando el valor del AR<sup>o</sup><sub>K</sub> se incrementó con la aplicación del fertilizante con K, los valores determinados en el presente estudio son inferiores a 0.008 y 0.09 (mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup>, reportados como valores extremos del AR<sup>o</sup><sub>K</sub> en 10 suelos de Polonia (Diatta *et al.*, 2006). Los bajos valores del K en solución (AR<sup>o</sup><sub>K</sub>) están relacionados con la actividad iónica del Ca y el Mg que se incrementaron por la adición del K y representaron 98.7% de los cationes en solución (Cuadro 2). De igual forma, la poca actividad del K en solución AR<sup>o</sup><sub>K</sub> es característica de suelos explotados por cultivos altamente demandantes de K, en los cuales se han determinado valores 0.00047 (mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup> en el AR<sup>o</sup><sub>K</sub> (Diatta *et al.*, 2006). Cabe recalcar que el valor del AR<sup>o</sup><sub>K</sub>, determinado en el suelo sin fertilizar y cuando

**Cuadro 2. Efecto de la fertilización potásica sobre los cationes intercambiables y solubles en un suelo arcilloso del sur de Tamaulipas, México.**

Dosis K	Cationes intercambiables			Saturación	Cationes Solubles		
	Ca	Mg	K	K	Ca	Mg	K
mg kg <sup>-1</sup>	cmol(+)kg <sup>-1</sup>			%	meq L <sup>-1</sup>		
0	43.20	4.38	0.37 b <sup>†</sup>	0.70	5.10 c	0.80 c	0.08 b
62	45.30	4.32	0.42 b	0.80	5.70 bc	1.10 bc	0.08 b
125	45.60	4.26	0.44 b	0.84	6.30 bc	1.20 abc	0.08 b
375	45.60	4.26	0.48 b	0.91	8.80 b	1.40 ab	0.12 b
750	45.60	4.30	0.76 a	1.45	12.50 a	1.60 a	0.23 a

<sup>†</sup> Medias con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey  $P \leq 0.05$ ). Porcentaje de saturación de K = (Kint/CIC)\* 100.

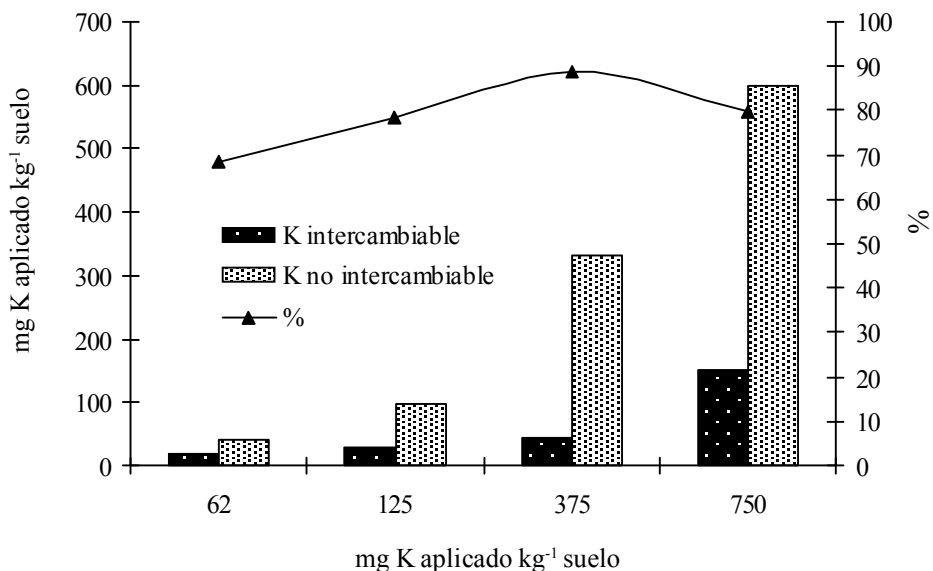


Figura 1. Potasio intercambiable, no intercambiable y porcentaje de K no cuantificado en los sitios de intercambio en un Vertisol incubado con cuatro dosis de K.

el suelo se fertilizó con 62 mg K kg<sup>-1</sup> suelo, fue bajo para abastecer la demanda de un cultivo con respecto a los valores de 0.001 a 0.030 (mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup> consignados como adecuados (Woodruff, 1955). Es decir, los valores de AR<sub>K</sub><sup>o</sup> determinados en el presente estudio fueron adecuados para desarrollar cultivos sólo cuando el suelo recibió más de 125 mg K kg<sup>-1</sup> suelo, lo que representa una fertilización de 450 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Los valores de AR<sub>K</sub><sup>o</sup> y K intercambiable mostraron una estrecha relación (R<sup>2</sup> = 0.85) (Cuadro 4).

Los valores de PBC<sub>K</sub> son un indicativo de la capacidad del suelo para mantener una actividad dada de K en condiciones de equilibrio, en caso de que el K que absorban las plantas se lixivie (Wang *et al.*, 2004). En el presente estudio, los valores de PBC<sub>K</sub> disminuyeron de 9.30 hasta 3.39 (cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>/ mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup> en el suelo sin fertilizar y en el que recibió la mayor dosis de fertilizante, respectivamente (Cuadro 3). Lo anterior sugiere que la concentración de K en solución AR<sub>K</sub><sup>o</sup>, determinada en el suelo fertilizado, requiere de un suministro frecuente de fertilizantes potásicos para mantenerse constante (Sparks y Liebhadt, 1981). Los valores de PBC<sub>K</sub>, determinados en el suelo arcilloso bajo estudio, son bajos con respecto a los determinados en 10 suelos de Polonia, cuyos valores fluctuaron entre 16.15 y 134.62 (cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>/ mol L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup> (Diatta *et al.*, 2006), pero son superiores a los consignados en suelos de Bogotá (Fassbender y Bornemisza, 1985) y suelos tropicales de México (Cruz *et al.*, 1993).

El K lábil (-ΔKL) representa la cantidad que puede estar rápidamente disponible, es decir, es el K que se intercambia entre los coloides y la solución del suelo (Beckett, 1965; Goeder *et al.*, 1975; Spark y Liebhadt, 1981). En el presente estudio, el suelo presentó valores entre 0.190 y 0.166 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup> mostrando la misma tendencia que el PBC<sub>K</sub> de disminuir con incrementos del K aplicado como fertilizante, la cual es inversa a la reportada por Conti *et al.*, (2001), quienes observaron incrementos en el valor del -ΔKL al fertilizar el suelo. Los decrementos en el K lábil, al incrementar la dosis de fertilizante aplicado, se pueden atribuir a la movilización del K intercambiable retenido en la superficie plana de la arcilla (-ΔK<sup>o</sup>) y de los sitios altamente específicos (-ΔK<sub>x</sub>), de donde fueron liberados, incrementando el K de la solución del suelo (AR<sub>K</sub><sup>o</sup>) (Cuadro 3). Los valores de -ΔKL, determinados en el estudio, indican que el suelo presenta una alta capacidad para suministrar K a las plantas como lo indicó Wang *et al.*, (2004), quienes habían consignado valores de -ΔKL entre 0.1 y 0.23 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup> en vertisoles. El reservorio del K lábil adherido a las cargas electroestáticas de la superficie plana de la arcilla (-ΔK<sup>o</sup>) se incrementó de manera inconsistente con la adición del fertilizante (Cuadro 3). Este K abastece inmediatamente el K absorbido por el cultivo o removido por lixiviación de la solución del suelo, y es mejor estimador del K lábil que el K intercambiable determinado con NH<sub>4</sub>OAc, 1N, pH 7.0 (LeRoux, y Sumner, 1968). Los valores

**Cuadro 3. Efecto de la aplicación de potasio como fertilizante sobre los parámetros Q/I en un suelo arcilloso de Tamaulipas.**

Dosis de K	AR <sup>o</sup> <sub>K</sub>	PBC <sub>K</sub>	-Δ KL	-Δ K <sup>o</sup>	-Δ Kx
mg K kg <sup>-1</sup>	(mol L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	(cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> / mol.L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>		
0	0.0004	9.30	0.190	0.020	0.170
62	0.0007	5.55	0.173	0.030	0.143
125	0.0010	4.20	0.159	0.027	0.132
375	0.0012	4.17	0.159	0.022	0.139
750	0.0017	3.39	0.166	0.027	0.139

de K intercambiable fueron mayores que los determinados en el  $-\Delta K^o$  y ambos valores correlacionaron significativamente ( $R^2 = 0.90$ ) (Cuadro 4).

El presente estudio mostró que más de 79% del K aplicado como fertilizante se determinó en sitios de donde es poco y lentamente accesible a la solución del suelo. Además, la alta concentración de Ca y Mg en ésta afectó la disponibilidad de K (AR<sup>o</sup><sub>K</sub>), y sólo aplicaciones superiores a 125 mg kg<sup>-1</sup> de K (equivalente a 450 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O como fertilización de base) permitieron al K competir con estos cationes. Esto pudiera explicar la escasa respuesta de los cultivos al K, cuando se manejan tradicionalmente con fertilización de base (Morazzani y Ortega, 1972) y con cantidades de K inferiores a las utilizadas en el presente estudio. Esta forma de manejo tradicional, en la cual el K extraído por los cultivos no se reincorpora al suelo, requiere aplicaciones elevadas de K como fertilizante, ya que sólo después de la saturación en los sitios altamente específicos (bordes y espacios entre las capas de arcilla), el K aplicado ocupará la superficie plana de las arcillas, de donde puede abastecer a la solución del suelo y los cultivos.

La información generada con un enfoque fisicoquímico permite inferir que la fertilización de base, aplicada al suelo antes del establecimiento del cultivo, incrementaría su eficiencia al utilizarse en un sistema de riego localizado, debido a: a) el mantener la humedad

del suelo cercana a la capacidad de campo, hidrataría la arcilla y facilitaría la liberación del K fijado entre las láminas, con lo cual aumentaría el K en la solución del suelo (AR<sup>o</sup><sub>K</sub>); b) la aplicación permanente de K en el agua de riego mejoraría el acceso de K a la raíz por flujo de masas, lo cual mejoraría la nutrición del cultivo. Sin embargo, para definir la fertilización de base y la concentración de K en el agua de riego que, usadas en forma conjunta, permitan satisfacer la demanda de los cultivos, se requiere realizar estudios con este enfoque fisicoquímico, el cual contempla las características de los suelos donde se pretende utilizar.

## CONCLUSIONES

- Entre 69 y 90% del potasio total aplicado como fertilizante no se cuantificó como K intercambiable y soluble. Con relación al suelo sin fertilizar, la adición de fertilizante potásico modificó el K intercambiable y los cationes solubles: al aplicar 750 mg kg<sup>-1</sup> de K se incrementó 2.1 veces el K intercambiable y 2.5, 2.0 y 2.9 veces la disponibilidad de Ca, Mg y K en solución, respectivamente.
- El K en la solución del suelo (AR<sup>o</sup><sub>K</sub>) se incrementó con la fertilización potásica; sin embargo, sólo con aplicaciones de 125 mg de K kg<sup>-1</sup> suelo o superiores como fertilización de base, la actividad del K no fue afectada por la actividad del Ca y el Mg en la solución

**Cuadro 4. Modelos de regresión, cuadrado medio del error de la regresión y coeficientes de determinación para algunos parámetros Q/I.**

Parámetro Q/I	Modelo de la regresión	CMER	R <sup>2</sup>
PBC <sub>K</sub> (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> / mol L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	Y = 1026.35 - 2.5641 (Kinterppm)	42464.7	0.43
AR <sup>o</sup> <sub>K</sub> (mol L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	Y = -0.0004 + 0.000007 (Kinterppm)	< 0.0001	0.85 †
Δ K <sup>o</sup> (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	Y = 0.329 + 0.028(Ksolppm)	0.0007	0.90 †
Δ KL (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	Y = 1.109 + 95.474 (Ksol)	0.421	0.55
Δ Kx (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	Y = 0.78 + 0.217 (Ksol)	0.387	0.51

† Significativo ( $P \leq 0.05$ ).

del suelo, presentando valores adecuados para abastecer la demanda de los cultivos.

- Los valores de K lábil total ( $-\Delta K_L$ ) disminuyeron de 1.90 a 1.66  $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ , en el tratamiento sin fertilizar y con 750 mg de K  $\text{kg}^{-1}$  suelo, respectivamente, en estos mismos tratamientos, el valor de  $\text{PBC}_K$  fluctuó entre 930 y 339 ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1} / \text{mol L}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>, lo cual indica la necesidad de suministrar fertilizantes potásicos para mantener constante la concentración en solución el K ( $\text{AR}^\circ_K$ ).

## LITERATURA CITADA

- Aguado-Lara, G., J. D. Etchevers B., C. Hidalgo M., A. Galvis S. y A. Aguirre G. 2002. Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia* 36: 11-21.
- Alvarado L., J. y J. Cruz D. 1993. Relaciones cantidad-intensidad (Q/I) de potasio en suelos tropicales. *Terra* 11: 127-134.
- Beckett, P. H. T. 1964. Studies on soil potassium II. The immediate Q/I relation of labile potassium in the soil. *J. Soil Sci.* 15: 9-23.
- Blake, L., S. Mercik, M. Koerschens, K. W. T. Goulding, S. Stempen, A. Weigel, P.R. Poulton, and D. S. Powlson. 1999. Potassium content in soil, uptake in plants and potassium balance in three European long-term field experiments. *Plant Soil* 216: 1-14.
- Bolio-López, G. I., S. Salgado-García, D. J. Palma-López, L. C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada y J. D. Etchevers-Barra. 2008. Dinámica del potasio en vertisoles y fluvisoles cultivados con caña de azúcar. *Terra Latinoamericana* 26: 253-263.
- Bouyoucos, G. J. 1951. A recalibration of the hydrometer for making mechanical analysis of soils. *Agron. J.* 43: 434-438.
- Bugarín M., R., A. Galvis S., T. M. Hernández M. y D. García P. 2007. Capacidad amortiguadora y cinética de liberación de potasio en suelos. *Agric. Téc. Méx.* 33: 73-81.
- Conti, M. E. 2002. Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo. [www.inpofos.org/ppiweb/ltams.nsf](http://www.inpofos.org/ppiweb/ltams.nsf) (Consulta: octubre 1, 2002).
- Conti, M. E., A. M. de la Horra, D. Effron, and D. Zourarakis. 2001. Factors affecting potassium fixation in Argentine agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 2679-2690.
- Cruz D., J., L. J. Cajuste, R. Carrillo G., E. Osoreo C. y O. Grajales M. 1993. Disponibilidad de K nativo, factores Q/I y potenciales químicos en tepetates de México. *Terra* 10: 399-407.
- Diatta J., B., Z. W. Kocialkowski W., and W. Grzebisz. 2006. Evaluation of potassium quantity-intensity parameters of selected polish agricultural soils. *Electron. J. Polish Agric. Univ., Agronomy* 9: 1-14.
- Etchevers, B. J., C. Zebrowski, C. Hidalgo M. y P. Quantin. 1991. Fertilidad de los tepetates II. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala (México). pp: 74-77. *In: Resúmenes ampliados. I. Simposio internacional sobre suelos volcánicos endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.*
- Evangelou, V. P., J. Wang, and R. E. Phillips. 1994. New developments and perspectives on soil potassium quantity/intensity relationships. *Adv. Agron.* 52: 173-227.
- Fassbender, H. W. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Goeder, W. J., J. K. Syers, and R. B. Corey. 1975. Relações quantidade-intensidade de potássio em solos Do Rio Grande Do Sul. *Pesq. Agropec. Bras.* 10: 30-35.
- Haby, A. V., M. P. Russelle, and E. O. Skogly. 1990. Testing soil for potassium, calcium and magnesium. pp. 181-227. *In: R. L. Westerman, R. L. (eds.). Soil testing and plant analysis. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.*
- Havlin, J. L., S. L. Tisdale, W. L. Nelson, and J. D. Beaton. 1999. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management.* Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Henríquez, C., E. Bornemisza y F. Bertsch. 1994. Fijación de potasio en vertisoles, andisoles y ultisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18: 133-140.
- Houba, V. J. G., I. Novozamsky, A. W. M. Huybregts, and J. J. van der Lee. 1986. Comparison of soil extractions by 0.01. M  $\text{CaCl}_2$ , by EUF and by some conventional extraction procedures. *Plant Soil.* 96: 433-437.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1988. Mapa de suelos dominantes. FAO/UNESCO/ISRIC. Primera aproximación. Escala 1: 4 000 000. SEMARNAP. México, D. F.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos. Omega. Barcelona, España.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. pp 635-661. *In: A. Klute (ed.). Method of soil analysis. Part 1. Agronomy. Monograph. 9. ASA and SSSA. Madison, WI, USA.*
- LeRoux, J. and M. E. Sumner. 1968. Labile potassium in soils: I Factors affecting the quantity-intensity (Q/I) parameters. *Soil Sci.* 106: 35-41.
- López Ritas, J. y López Mérida, J. 1990. El diagnóstico de suelos y plantas. Mundi Prensa. Madrid, España.
- Miehlich, G., W. Heide y W. Kneib. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada de México. Suplemento de comunicaciones. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Puebla, México.
- Morazzani H., R. y E. Ortega T. 1972. Contenido de las distintas formas de potasio en suelos tropicales de México. *Agrociencia* 7: 37-46.
- Richards, L. A. 1947. Pressure membrane apparatus: construction and use. *Agric. Eng.* 28: 451-454.
- SAS. 1989. SAS/STAT User's Guide, Release 6th ed., Version 6.12. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schofield, R. K. 1947. A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. *Proc. Intern. Congr. Applied Chem.* 3: 257-261.
- Sparks, D. L. and W. C. Liebhardt. 1981. Effect of long-term lime and potassium applications on quantity-intensity (Q/I) relationships in sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 786-790.
- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. Effect of variation in digestion conditions and inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-264.
- Woodruff, C. M. 1955. The energies of replacement of calcium by potassium in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 19: 167-171.
- Zamudio-González, B., A. Vázquez-Alarcón, J. A. Salazar-Hernández y G. Alcántar-González. 2007. Disponibilidad y movimiento vertical de potasio en fluvisoles con riego por goteo simulado. *Terra Latinoamericana* 25: 287-295.