

CAPACIDAD AMORTIGUADORA Y CINÉTICA DE LIBERACIÓN DE POTASIO EN SUELOS*

POTASSIUM BUFFERING CAPACITY AND RELEASE KINETICS IN SOILS

Rubén Bugarín Montoya^{1§}, Arturo Galvis Spinola², Teresa Marcela Hernández Mendoza³ y Diego García-Paredes¹

¹Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit. Amado Nervo s/n Col. Los Fresnos, Ciudad de la Cultura. 63155 Tepic, Nayarit, México. ²Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. ³Universidad Autónoma Chapingo. [§]Autor para correspondencia: rbugarin@nayar.uan.mx

RESUMEN

La capacidad amortiguadora y cinética de liberación del potasio (K) en el suelo regulan la disponibilidad de este nutrimento para los cultivos. Ambas características fueron estudiadas en tres suelos con diferente capacidad de intercambio catiónico (CIC) con el objetivo de: a) determinar el efecto del Potasio agregado y del período de incubación sobre el contenido de Potasio en la solución del suelo y el intercambiable, b) capacidad amortiguadora y c) cuantificar la cinética de liberación. El estudio se realizó en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México, México de enero de 2000 a febrero de 2002. Se evaluaron cuatro dosis de Potasio agregado 0, 100, 200 y 400 mg kg⁻¹ de suelo con KH₂PO₄ y cuatro períodos de incubación 0, 6, 12 y 24 h a capacidad de campo y 35 °C. Para el análisis de otros datos se utilizó un diseño factorial completamente al azar con tres repeticiones. Después de aplicados los tratamientos, las muestras se sometieron a extracciones sucesivas de Potasio con CaCl₂ 0.01M y a los procedimientos estándares de extracción con NH₄OAc 1N pH 7.0 y HNO₃ 1M. El Potasio agregado incrementó significativamente el contenido de Potasio en la solución y del intercambiable, cuya magnitud estuvo asociada a la CIC (Pr>F= 0.0001). La variación de la cantidad de Potasio en la solución en función del valor de Potasio intercambiable (debido al KH₂PO₄ adicionado) se relacionó en forma lineal y la pendiente correspondió a la

capacidad amortiguadora, con valores de 0.92, 0.67 y 0.50 para los suelos con CIC de 3.05, 11.25 y 30.15 cM₍₊₎ kg⁻¹ de suelo, respectivamente. El período de incubación no influyó en la capacidad amortiguadora ni en los valores del K en la solución y K intercambiable. La cinética de desorción de K se ajustó a una función potencial, mientras que la acumulación del mineral desorbido correspondió a una función logarítmica y en ambos casos, las pendientes se correlacionaron con la CIC, r = 0.80** y 0.98**, respectivamente.

Palabras clave: Desorción, potasio en solución, potasio intercambiable.

ABSTRACT

Buffering capacity and potassium (K) release kinetics in soil “determine” its availability for crops. Both characteristics were evaluated in three soils with different cationic exchange capacity (CEC), with the objective of determining the effect of added Potassium and incubation period on potassium content in the soil solution and exchangeable Potassium, its buffering capacity and release the kinetics of Potassium. The study was carried out in the Soil Fertility Laboratory at the Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de Mexico, Mexico from January 2000 to February 2002. Four levels of Potassium were added: 0, 100, 200 and 400 mg kg⁻¹ of

* Recibido: Septiembre de 2005
Aceptado: Marzo de 2007

soil with KH_2SO_4 and four incubation periods 0, 6, 12 and 24 h at field capacity and at temperature of 35 °C. Data was analyzed as factorial completely random design with three replications. After treatments, soil samples were submitted to successive Potassium extractions with CaCl_2 0.01M and to the standard procedure of K extraction with NH_4OAc 1N, pH 7.0 and HNO_3 1M. The addition of KH_2SO_4 showed significant increases of Potassium in the soil solution and exchangeable K, whose magnitudes were associated to CEC ($P > F = 0.0001$). The Potassium content in the soil solution and exchangeable Potassium were linearly correlated and the slope corresponded to the buffering capacity with values of 0.92, 0.67 and 0.50 for the soils with CEC of 3.05, 11.25 and 30.15 $\text{cm}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ of soil, respectively. The incubation period did not influence buffering capacity, content of Potassium in the soil solution and exchangeable Potassium values. Potassium desorption kinetics was adjusted to a potential function, meanwhile the accumulation of desorbed Potassium to a logarithmic function, the corresponding slopes were correlated to CEC, with $r = 0.80^{**}$ and 0.98^{**} , respectively.

Key words: Desorption, exchangeable potassium, potassium in soil solution.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del potasio (K) para los cultivos depende de la dinámica de intercambio de este nutrimento en el suelo, en la cual participa una fracción activa de aporte inmediato o mediato y otra pasiva de aporte a largo plazo. A la fracción pasiva corresponde el Potasio que forma parte de la estructura de los minerales y no contribuye en la nutrición de los cultivos durante un ciclo de crecimiento. La fracción activa está constituida por tres componentes o reservas: El Potasio en la solución del suelo (Ks); el adsorbido en los sitios de intercambio, llamado Potasio intercambiable (Ki) y el ocluido en el interior de las arcillas filosilicatadas, denominado Potasio no intercambiable (Kni) (Rodríguez *et al.*, 2001). Aunque la diferencia entre una y otra de las reservas activas de Potasio es arbitraria, se han identificado por medio de técnicas de extracción química. La raíz absorbe el Potasio principalmente del Ks. Cuando esto ocurre, se activa de inmediato un flujo del Kni al Ki y de éste al Ks (Meyer y Jungk, 1993), a través de procesos de liberación o difusión entre Kni y Ki y de adsorción-desorción entre Ki y Ks que ocurren en *continuum* (Rodríguez y Galvis, 1989). La dirección del flujo de Potasio tiende siempre hacia un

equilibrio y está determinada por el grado de saturación que presente una o más de las reservas activas (Kauffman y Bouldin, 1967; Németh *et al.*, 1970).

La extracción de Ki con NH_4OAc 1N, pH 7.0, (Knudsen *et al.*, 1982) se emplea ampliamente para hacer recomendaciones de fertilización potásica en los cultivos agrícolas; sin embargo, este método en general, no refleja la disponibilidad actual ni las reservas de K en el suelo (Mengel, 1982). En los casos en que las reservas edáficas son altas o desaturadas no se correlaciona con el rendimiento de los cultivos o con la absorción de Potasio por las plantas (Martín y Sparks, 1983; Rodríguez y Galvis, 1989). La cantidad de K que extrae un cultivo del suelo se da en función de la concentración de Ks (intensidad de suministro) y de la capacidad amortiguadora del suelo (During y Duganzich, 1979; Mengel, 1982), la cual depende de la cantidad y tipo de arcilla presente (Németh, 1975). El equilibrio entre el Ki y el Ks ocurre en forma casi instantánea; por lo tanto, la capacidad de un suelo para reponer el Ks a partir del Ki es un índice de labilidad del Ki y del equilibrio entre Ks y Ki (Rodríguez y Galvis, 1989). La relación entre estas dos reservas activas se denomina capacidad amortiguadora de potasio (cK) y es útil para determinar la cantidad disponible de este elemento para la nutrición de las plantas. El Kni constituye una fuente significativa de Potasio, ya que en algunos casos contribuye con más del 60% del total extraído por un cultivo (Mitsios y Rowell, 1987a) y su aprovechamiento depende de la tasa con la que se transfiere a Ki (Grimme, 1974); por lo tanto, para diagnóstico en suelos con alto contenido de arcilla del tipo 2:1, es conveniente cuantificar la capacidad de suministro de K a través de la cinética de su liberación y no solo determinar el contenido de Ki (Sparks, 1987; Mengel *et al.*, 1998).

Dada la relativa inmovilidad del K en el suelo, otro factor que influye sobre su disponibilidad es la eficiencia de absorción por los cultivos (Rodríguez *et al.*, 2001), la cual es función de la densidad radical (van Noordwijk y de Willigen, 1987) y la técnica de fertilización. Por lo anterior, la contribución del Kni a la nutrición de las plantas se reduce a medida que la densidad radical disminuye y su absorción es función de las características con que se libere de los minerales de arcilla y de que el cultivo reduzca el contenido de Ki a un nivel crítico, lo cual depende de la cantidad de Ki presente y de la tasa de difusión de Ki a Ks (Mitsios y Rowell, 1987b).

El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto del K agregado y tiempo de incubación sobre el contenido de Ks y Ki en suelos con diferente capacidad de intercambio

catiónico, determinar la capacidad amortiguadora de potasio (cK) y cuantificar las reservas edáficas de Potasio y su tasa de abatimiento mediante extracciones sucesivas de Ks.

MATERIALES Y MÉTODOS

Capacidad amortiguadora de potasio

La cK se determinó en tres suelos agrícolas colectados de 0-20 cm de profundidad en los estados de Baja California, Tabasco y Guanajuato; las muestras fueron seleccionadas por su diferente contenido de arcilla y CIC (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades de los suelos estudiados.

Suelo N°	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	Materia orgánica (%)	Absorbancia C soluble	CIC (cM ₍₊₎ kg ⁻¹)
	-----g kg ⁻¹ de suelo-----						
1	560	348	92	MA	3.28	0.757	11.25
2	774	182	44	AM	1.40	0.383	3.05
3	61	471	468	AL	3.28	0.445	30.15

MA= Migajón arenoso; AM= Areno migajoso; AL= Arcillo limoso; CIC= Capacidad de intercambio catiónico.

El suelo 1 se colectó en un terreno plano cultivado con hortalizas de hoja en el Valle de Maneadero, Baja California. El suelo 2 corresponde a un suelo con cobertura de pasto remolino (*Paspalum sp.*) en Emiliano Zapata, Tabasco y el suelo 3 se colectó en el Bajío Guanajuatense, previamente cultivado con trigo (*Triticum aestivum* L.) con el sistema de quema y cero labranza. Las muestras se secaron al aire y a la sombra y se tamizaron en malla de 2 mm.

Análisis de los suelos. El experimento se efectuó en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Posgraduados en Montecillo, Estado de México, México durante el período de enero del 2000 a febrero del 2002. La distribución del tamaño de partículas se determinó mediante el método de la pipeta (Day, 1965). El contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (Alcántar y Sandoval, 1999). La determinación del carbono soluble se realizó con el método propuesto por Fox y Piekielek (1978). El K, Ca, Mg y Na intercambiables fueron extraídos con NH₄OAc 1N, pH 7.0 y analizados por espectrofotometría de absorción atómica (Alcántar y Sandoval, 1999). La CIC se determinó con el método descrito por Chapman (1965).

Desarrollo experimental. A los tres suelos seleccionados se les aplicaron cuatro dosis de K: 0, 100, 200 y 400 mg kg⁻¹ de suelo (KH₂PO₄ como fuente) y se sometieron a cuatro períodos de incubación: 0, 6, 12 y 24 h. Los datos obtenidos se analizaron con un diseño factorial completamente al azar con tres repeticiones. El procedimiento empleado [similar al propuesto por Hernández (1997) para el caso del P] consistió en lo siguiente: *i*) 2.5 g de suelo se colocaron en una bolsa de plástico con capacidad de 10 cm³, *ii*) se adicionaron las dosis de K al suelo (en solución) y se llevó a capacidad de campo, *iii*) las bolsas con el suelo se introdujeron en tubos de ensayo de 25x150 mm y se incubaron a 35 °C durante los períodos señalados, a cada repetición le correspondió un tubo de ensayo y *iv*) después del período de incubación se

analizó el contenido de Ks mediante su extracción con CaCl₂ 0.01M y el contenido de Ki mediante su extracción (por separado) con NH₄OAc 1N, pH 7.0. Los valores de Ks y Ki se analizaron con el paquete estadístico SAS versión 6 (SAS Institute, 1999) mediante el procedimiento PROC ANOVA y la prueba de Tukey ($p < 0.01$) para la comparación de medias. Los valores de Ks y Ki observados se relacionaron mediante una regresión lineal simple cuya pendiente correspondió al valor de cK para cada tipo de suelo, su variación se determinó con base en el período de incubación.

Cinética de liberación de potasio

La cinética de liberación de K fue evaluada en los mismos suelos del experimento anterior, excepto el suelo 1, que fue substituido por otro colectado en el mismo predio del Valle de Maneadero, Baja California, cultivado con alfalfa (*Medicago sativa* L.) y previamente abonado con estiércol de bovino. Se realizaron 12 extracciones (lavados) sucesivas con CaCl₂ 0.01M con un equipo automatizado (Centurion Int. Inc. Lincoln, Nebraska); se emplearon jeringas de

plástico de 50 ml. Al fondo de la jeringa se depositó primero una capa de 1 g de algodón y en seguida 10 g de arena sílica y sobre de ésta 2.5 g de la muestra de suelo, la cual fue protegida en la parte superior con capas de los mismos materiales (Figura 1).

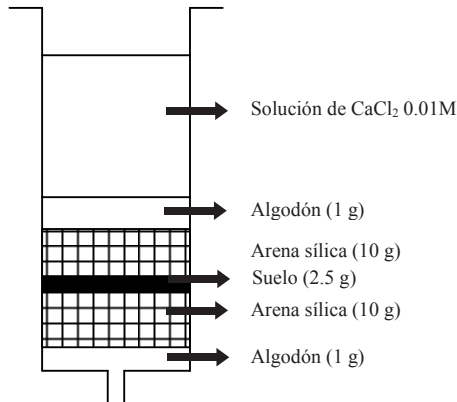


Figura 1. Esquema que ilustra la colocación de la muestra de suelo entre las capas de arena sílica y algodón en el interior de una jeringa para efectuar las extracciones de potasio.

El algodón y la arena sílica fueron lavados previamente con agua destilada desionizada y secados en estufa. Previa a las extracciones, las muestras de suelo se llevaron a capacidad de campo con CaCl_2 0.01M y se conservaron durante 24 h a 35 °C. Las extracciones se realizaron mediante lavados con 25 ml de CaCl_2 0.01M durante 30 min. Se efectuaron cinco repeticiones

para cada tipo de suelo. El procedimiento de extracción consistió en conectar otra jeringa a cada una de las que contenían la muestra de suelo y mediante el accionar del equipo a velocidad constante se generó una succión uniforme que forzó el paso de la solución extractora por todo el perfil de la muestra. La cantidad de Potasio extraído fue determinada por flamometría (Flame Photometer Corning 400). Los valores acumulados del Potasio extraído (mg kg^{-1} de suelo) se graficaron en función del número de extracciones y a cada suelo se le ajustó un modelo matemático teórico. Asimismo, a los suelos estudiados se les determinó el K_s , K_i y K_{ni} con los procedimientos estándares de extracción con CaCl_2 0.01M, NH_4OAc 1N pH 7.0 y HNO_3 1M, respectivamente (Knudsen *et al.*, 1982).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capacidad amortiguadora de K

Se observó una variación proporcional estadísticamente significativa en el contenido de K_s y K_i con respecto a la cantidad de Potasio agregado y la magnitud del cambio dependió de la CIC (Cuadro 2).

Por efecto del Potasio agregado se observó que a mayor CIC, los cambios en el contenido de K_s y K_i fueron menores y viceversa, lo cual significa que el K_s y el K_i están íntimamente relacionadas a esta propiedad de los suelos, la

Cuadro 2. Efecto del K agregado sobre K_s y K_i en suelos con diferente CIC, indistintamente del período de incubación.

K agregado (mg kg^{-1} de suelo)	CIC ($\text{cMol}_{(+)}$ kg^{-1} de suelo)					
	3.05		11.25		30.15	
	K_s	K_i	K_s	K_i	K_s	K_i
 mg K kg^{-1} de suelo					
0	50.8	70.8	680.0	1119.1	225.0	715.1
100	123.8	171.1	755.0	1200.0	302.5	799.1
200	238.7	265.0	822.8	1268.3	342.5	895.0
400	395.5	448.3	947.5	1493.3	417.0	1066.6
Significancia ($P > f$):						
	K_s		K_i			
CIC	0.0001 **	0.0001 **				
K	0.0001 **	0.0001 **				
T	0.4815 NS	0.5792 NS				
CIC*K	0.0001 **	0.1431 NS				
CIC*T	0.0001 **	0.0075 **				
K*T	0.0001 **	0.7299 NS				

**= Altamente significativo; NS= Diferencias no significativas; K= K agregado; T= Período de incubación.

cual es función de la cantidad y tipo de arcilla que contienen (Rodríguez, 1993). En los periodos de incubación evaluados no se observó variación estadística en el K_s y el K_i en relación al Potasio agregado en ninguno de los suelos, por lo que se corrobora que la reacción (al agregar K) sucede de manera inmediata y de acuerdo con Rodríguez y Galvis (1989) la relación entre K_s y K_i se mantiene constante después de 33 días.

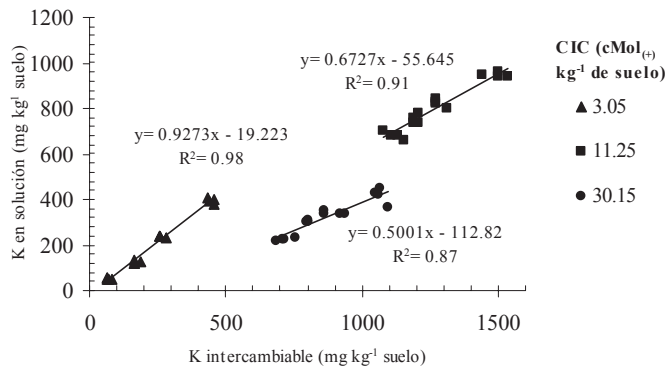


Figura 2. Variación del contenido de K_s en función de K_i obtenido al agregar concentraciones crecientes de K, en tres tipos de suelo con diferente CIC.

A las relaciones entre el K_s y el K_i se les ajustó una función lineal (una para cada tipo de suelo) cuyas pendientes correspondieron a la cK (Figura 2) y se correlacionaron significativamente con el valor de la CIC ($R^2 = 0.89$) (Figura 3). El cK representa la variación del K_s en función del K_i presente en el suelo, donde un valor cercano a 1.0 significa que el suelo ofrecerá menor resistencia a un cambio en la reserva de K_s con respecto a la cantidad de K_i presente, lo que ocurre en suelos con CIC baja y es característico de suelos con alta proporción de arena. Cuando el valor de cK tiende a cero, se requiere una reserva más grande de K_i para lograr un mismo valor de K_s , lo que indica que habrá mayor resistencia del suelo para modificar la reserva de K_s , característico de suelos con alto contenido de arcilla tipo 2:1. Por lo tanto, en un suelo arenoso con CIC baja, la reserva de K_s se incrementa con menor cantidad de K agregado que en un suelo arcilloso con alta CIC, pero también el abatimiento de K_s será más rápido en un suelo arenoso que en un arcilloso.

En las partículas de las arcillas del tipo 2:1, el K se adsorbe en tres posiciones, en el interláctice, en los bordes y en la superficie plana; estas posiciones difieren entre sí respecto a su selectividad para K (Németh *et al.*, 1970). Cuando las posiciones no se encuentran saturadas de K y se adiciona

este mineral al suelo, éste se incrementa por adsorción en la superficie plana; por consiguiente aumenta la concentración de K_s (Schouwenburg y Schuffelen, 1963). También es posible que parte del K agregado sea retenido en los bordes y posteriormente pase a ocupar sitios vacíos en el interláctice como K_{ni} . La mineralogía de las arcillas juega un papel importante en el control de la tasa de liberación del K_{ni} y la cantidad de K_i presente en el suelo y tiene relación directa con la liberación de K_{ni} ; por su parte, la cK controla en gran parte la tasa de difusión de K_i al K_s (Mitsios y Rowell, 1987b).

Hubo una correlación estrecha entre el cK y la CIC. Al aumentar la CIC (Figura 3) ocurre una disminución en la cK , por lo que la cK podría ser estimada a partir de la CIC. De acuerdo con Rodríguez y Galvis (1989), los factores que definen el cK son la afinidad por K en los sitios de intercambio (específicos para cada tipo de arcilla) y la cantidad de sitios dado por la CIC.

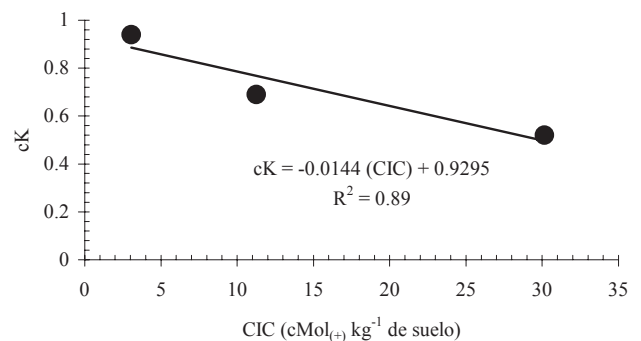


Figura 3. Relación entre la CIC y la cK de los tres suelos estudiados.

Cinética de liberación de potasio. En los suelos estudiados, el abatimiento de K_s se ajustó a una función potencial, cuya pendiente negativa fue diferente para cada tipo de suelo (Figura 4a). La acumulación de K_s se ajustó a una función logarítmica (Figura 4b) y en ambos casos, las pendientes se asociaron estrechamente con la CIC ($r = 0.98$ y 0.80 , respectivamente). En el suelo con mayor CIC (30.15 cMol₍₊₎ kg⁻¹ de suelo) el abatimiento fue más lento con respecto a los otros, aunque la cantidad extraída fue mayor (Figura 4a).

En los suelos 1 y 2 con CIC de 13.83 y 3.05 cMol₍₊₎ kg⁻¹ de suelo respectivamente, la mayor cantidad de K liberado se obtuvo en las dos primeras extracciones y posteriormente disminuyó de manera constante. Sin embargo, en el suelo 3 con CIC de 30.15 cMol₍₊₎ kg⁻¹ de suelo, la liberación se mantuvo estable después de la sexta extracción, porque las reservas de K son más grandes en este tipo de suelo que en los demás (Figura 4a).

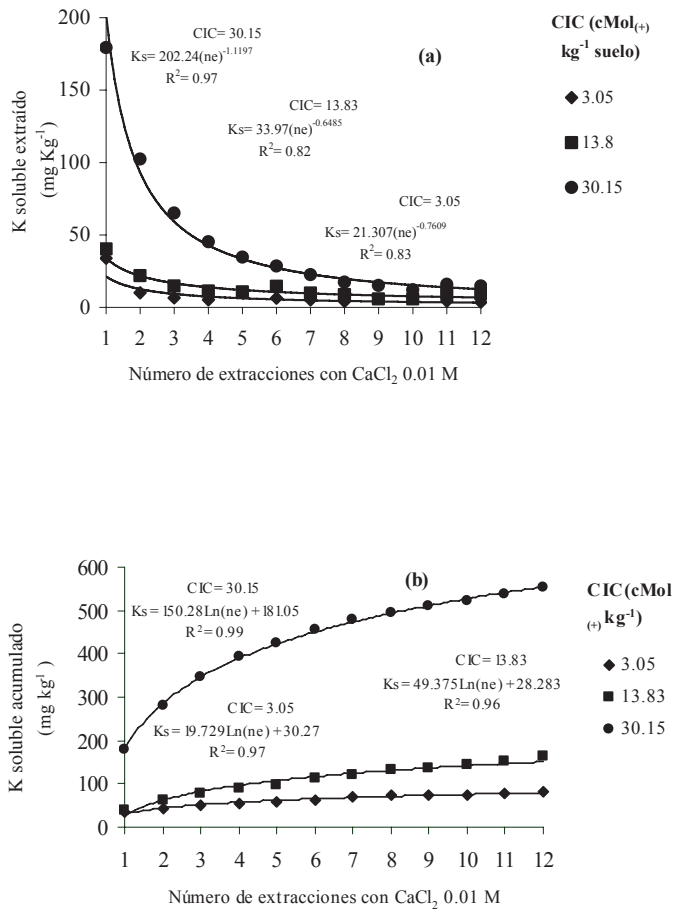


Figura 4. Potasio en solución obtenido mediante extracciones sucesivas en tres suelos con diferente CI: a) Abatimiento de las reservas de K y b) Cantidad de K acumulado.

En estudios sobre la cinética de liberación de K, autores como López-Piñero y García-Navarro (1997) sugirieron como valor límite de incrementos para finalizar las extracciones 7.82 mg K kg⁻¹ de suelo lo cual fue posible con 10 extracciones sucesivas. Sin embargo, en el presente trabajo los valores finales después de 12 extracciones variaron de 0.3 mg K kg⁻¹ de suelo en el suelo con menor CIC a 1.17 mg K kg⁻¹ de suelo para el de mayor CIC. La cantidad y tipo de arcilla en el suelo son dos características fundamentales que influyen sobre el grado de saturación de potasio y de ello depende la tasa de liberación (Németh, 1975). El K adsorbido en las posiciones de intercambio es inmediatamente transferible a la solución del suelo y su cinética de liberación al igual que el Kni, está controlada por un proceso de difusión (Cox y Joern, 1997). Una vez liberados los iones, se trasladan por efecto

del gradiente de mayor concentración hacia zonas de menor concentración. El proceso difusivo es suficientemente rápido para que el potasio adsorbido en las superficies externas reponga el que absorben las plantas de la solución del suelo (Talibudeen, 1981).

La acumulación de el Ks extraído (Figura 4b) se ajustó a una función logarítmica (ecuación de Elovich) tal y como ha sido reportado previamente (López-Piñero y García-Navarro, 1997; Martin y Sparks, 1983; Mengel *et al.*, 1998). La desorción de K también ha sido descrita mediante ecuaciones potenciales (Havlin *et al.*, 1985; Sharpley, 1987), difusión parabólica (Sparks y Jardine, 1984) y de primer orden (Sivasubramaniam y Talibudeen, 1972). Cox y Joern (1997) aplicaron cuatro modelos matemáticos para estimar la liberación de Kni con tetrafenil-borato de sodio (NaBPh₄). La liberación de Kni en la mayoría de los suelos estudiados pudo ser descrita por las ecuaciones de Elovich, Elovich simplificada, difusión parabólica y función potencial; sin embargo, ninguna función describió adecuadamente la fase inicial de liberación del Kni. A su vez, la cinética de adsorción de Potasio también ha sido descrita mediante varias ecuaciones (Sparks y Jardine, 1984). Aun cuando existen variaciones en los modelos matemáticos empleados para describir ya sea el proceso de desorción o adsorción de Potasio, debido entre otros factores, a la cantidad y tipo de arcilla presente, constituyen una herramienta con valor predictivo de los cambios que pueden ocurrir en las reservas de Potasio en sistemas de producción agrícola.

Se han utilizado diferentes métodos para la extracción de Potasio del suelo y estimar la disponibilidad de este elemento para los cultivos, tanto de las formas lábiles como de Kni y de la relación dinámica entre ambos. Cox y Joern (1997) observaron que las tasas de liberación de Potasio se incrementaron conforme el tamaño de la partícula de suelo disminuyó, lo cual indica que la liberación rápida inicial se debió a la fracción de arcilla fina y arcilla-cuarzo. La liberación más lenta fue principalmente a partir de arcilla-cuarzo y la fracción de limo fino. Existen evidencias que el limo fino es una importante fuente de Kni que puede ser utilizado por los cultivos (Mengel *et al.*, 1998).

En los suelos 1 y 2, la cantidad total de potasio desorbido mediante las extracciones sucesivas correspondió a 1.3 veces el Ki, lo cual sugiere que alguna proporción del Kni fue también desorbido. En el suelo 3 la cantidad acumulada de Potasio desorbido fue equivalente al valor de Ki (Cuadro 3), por lo que no se liberó Kni del interlátice en donde la

fuerza de retención de Potasio es alta, ya que se trata de un suelo con alto contenido de arcilla del tipo 2:1. Dhillon *et al.* (1989) reportaron que fue difícil extraer todo el Kni mediante la técnica de extracciones sucesivas, aun empleando diferentes electrolitos; además, encontraron que la eficacia de los extractantes (0.01 M) disminuyó en el orden: BaCl₂> NH₄Cl> CaCl₂> NaCl.

En otro estudio, Dhillon y Dhillon (1992) observaron que en suelos Aluviales (Inceptisoles y Entisoles), en los cuales el mineral de arcilla predominante es la illita, se extrajo significativamente mayor cantidad de Potasio con NaBPh₄ 0.3 M que en los suelos negros esmectíticos (Vertisoles) y rojos caoliníticos (Alfisoles), por lo que la magnitud de Potasio liberado a partir de la superficie y posición interlamina de la arcilla fue en la secuencia: Illita > esmectita > caolinita. Mitsios y Rowell (1987b) señalaron que en Entisoles y Vertisoles más del 70% del Ki tuvo que ser removido antes de que comenzara la liberación de Kni, lo que no se logró en el presente estudio.

En la Figura 5, se observa el porcentaje de Potasio retenido en los tres suelos estudiados después de dos extracciones sucesivas con CaCl₂ 0.01 M, pero que previamente fueron sometidos a 12 extracciones sucesivas de Ks con esta misma solución y posteriormente se les agregaron cantidades variables de Potasio en forma de KH₂PO₄. A medida que un suelo tiene mayor CIC, aumenta la retención de Potasio debido a la cantidad de sitios disponibles en las posiciones de intercambio de las arcillas presentes, y se corrobora la factibilidad de reabastecer las reservas de Ki y Kni después de una fuerte desorción de K, indicativo de la capacidad de auto-regulación del sistema.

En la naturaleza, los flujos de K en los procesos de adsorción y desorción se dan en ambos sentidos de manera continua. Dichos procesos son afectados por diversos factores dentro de los que destacan el humedecimiento y secado de los

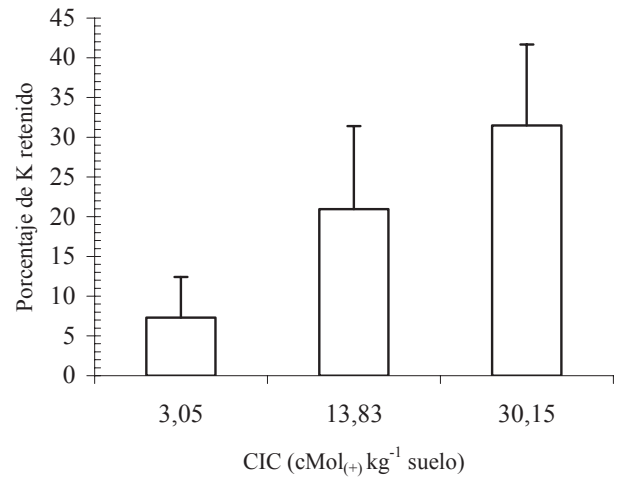


Figura 5. Porcentaje de K retenido en suelos con diferente CIC después de dos extracciones sucesivas con CaCl₂ 0.01M, previamente sometidos a 12 extracciones sucesivas y la adición de cantidades variables de K. Las barras indican el error estándar.

suelos (Onchere *et al.*, 1989; Poss *et al.*, 1991; Zeng y Brown, 2000), tipo y cantidad de arcilla presente (Mitsios y Rowell, 1987b; Dhillon *et al.*, 1989) y densidad radical de las plantas (Page y Talibudeen, 1982; Mengel *et al.*, 1998). En el proceso de intercambio catiónico en las arcillas (partículas <2 μm) y limo (2-60 μm) la preferencia de cationes sigue la serie liotrópica para cationes monovalentes: v.g. Li<Na<H₃O⁺<K<NH₄⁺<Rb<Cs; en esmectitas la preferencia de cationes monovalentes decrece en el siguiente orden: Cs>Rb>K≅NH₄⁺>Na>Li (Talibudeen, 1981). Lo anterior significa que en suelos agrícolas en los que ha ocurrido un abatimiento del contenido K, o que de manera natural presentan poca reserva de K disponible, es posible incrementar los niveles de Ks, Ki y Kni con la aplicación de fertilizantes potásicos, como ha sido demostrado en experimentos de larga duración (Cope, 1981); sin embargo,

Cuadro 3. Cantidad de K en las diferentes reservas y Ks liberado mediante 12 extracciones sucesivas en tres suelos con diferente CIC.

Nº de Suelo	CIC cMol(+) kg ⁻¹	Arcilla g kg ⁻¹ de suelo	Ks	Reservas			
				Ki	Kni	Ks-12 ext	
mg kg ⁻¹ de suelo							
1	13.83	96	70.7	126.7	1562.0	161.8	
2	3.05	44	45.3	64.0	120.0	82.5	
3	30.15	468	190.0	556.7	1386.0	552.7	

la aplicación deberá efectuarse en forma adecuada para lograr un contenido de K inicial en el suelo que permita emplear posteriormente dosis de mantenimiento, que se caracteriza por ser cuantitativamente menor que la dosis correctiva. En los suelos arenosos es posible elevar los niveles de K más rápido y con menor cantidad de fertilizante que en suelos con altos contenidos de arcilla tipo 2:1. Los resultados aquí obtenidos también sugieren que en los suelos arcillosos desaturados puede no haber respuesta de los cultivos a la fertilización potásica, debido a que el K agregado se difunde hacia la reserva de K_i y de ahí al K_{ni} donde es retenido con mayor energía, a menos que la dosis aplicada sea suficiente para saturar las reservas pasivas de K y permita que una fracción se presente en los sitios de intercambio y en la solución del suelo.

CONCLUSIONES

En los suelos estudiados, la cinética de desorción de K se ajustó a una función potencial, mientras que la acumulación del K desorbido, a una función logarítmica y en ambos casos las pendientes se asociaron estrechamente con la CIC. Asimismo, la adición de K a suelos de diferente clase de textura promovió incrementos significativos en las reservas de K_s y K_i y la magnitud del cambio también estuvo asociada a la CIC. La variación del K_s en función del valor de K_i (obtenido por el K agregado) se ajustó a funciones lineales, cuya pendiente correspondió a la cK .

El período de incubación de los suelos no influyó en las variaciones del cK ni en los valores del K_s y K_i observados; lo que confirma que la reacción del suelo a la adición de K sucede de manera inmediata. Las reservas edáficas de K también se asociaron significativamente con la CIC. Los valores de la cK podrían ser empleados para determinar la cantidad disponible de K en los suelos agrícolas.

LITERATURA CITADA

- Alcántar G. G. y Sandoval V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, Estado de México, México 156 p. (Publicación Especial 10).
- Chapman, H. D. 1965. Cation-exchange capacity. *In: Methods of soil analysis*. C. A. Black (ed). American Society of Agronomy, Madison, Wi, USA. Agronomy No. 9, part 2:891-900.
- Cope, J. T. Jr. 1981. Effects of 50 years of fertilization with phosphorus and potassium on soil test levels and yields at six locations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:342-347.
- Cox, A. E. and Joern, B. C. 1997. Release kinetics of nonexchangeable potassium in soils using sodium tetraphenylboron. *Soil Sci.* 162(8):588-598.
- Day, P. R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. *In: C. A. Black et al.* (ed.), *Methods of soil analysis*. Part 1. *Agronomy* 9:545-566.
- Dhillon, S. K.; Sidhu P. S. and Bansal, R. C. 1989. Release of potassium from some benchmark soils of India. *J. Soil Sci.* 40:783-797
- Dhillon, S. K. and Dhillon, K. S. 1992. Kinetics of release of potassium by sodium tetraphenyl boron from some soil samples of red (Alfisols), black (Vertisols) and alluvial (Inceptisols and Entisols) soils of India. *Fert. Res.* 32:135-138.
- During, C. and Duganzich, D. M. 1979. Simple empirical intensity and buffering capacity measurements to predict potassium uptake by white clover. *Plant and Soil* 51:167-176.
- Fox, R. H. and Piekielek, W. P. 1978. A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of a soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:751-753.
- Grimme, H. 1974. Potassium release in relation to crop production. *Proc. 10th Int. Colloquium, Potash Institute, Bern, Switzerland.* p. 131-136.
- Havlin, J. L.; Westfall, D. G. and Olsen, S. R. 1985. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 9:371-377.
- Hernández, M. T. M. 1997. Variación de la dinámica nutrimental edáfica. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Programa de Edafología. Montecillo, Estado de México, México. 111 p.
- Kauffman, M. D. and Bouldin D. R. 1967. Relationships of exchangeable and non-exchangeable potassium in soils adjacent to cation-exchange resins and plant roots. *Soil Sci.* 104:145-150.
- Knudsen D.; Peterson, G. A. and Pratt, P. F. 1982. Lithium, sodium and potassium. *In: Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. Page, A. L.; Miller, R. H. and Keeney, D. R. (eds.). 2nd ed. Series Agronomy N° 9. Am. Soc. Agr. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wi, USA. p. 225-246.
- López-Piñero A. and García Navarro A. 1997. Potassium release kinetics and availability in unfertilized

- Vertisols of southwestern Spain. *Soil Sci.* 162(12):912-918.
- Martin, H. W. and Sparks, D. L. 1983. Kinetics of non-exchangeable potassium release from two Coastal Plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:883-887.
- Mengel, K. 1982. Factors of plant nutrient availability relevant to soil testing. *Plant and Soil* 64:129-138.
- Mengel, K., Rahmatullah, and Dou, H. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-derived soils. *Soil Sci.* 163:805-813.
- Meyer, D. and Jungk, A. 1993. A new approach to quantify the utilization of non-exchangeable soil potassium by plants. *Plant and Soil* 149:235-243.
- Mitsios, I. K. and Rowell, D. L. 1987a. Plant uptake of exchangeable and non-exchangeable potassium. I. Measurement and modelling for onion roots in a Chalky Boulder Clay soil. *J. Soil Sci.* 38:53-63.
- Mitsios, I. K. and Rowell, D. L. 1987b. Plant uptake of exchangeable and non-exchangeable potassium. II. Influence of soil type on uptake by onion roots. *J. Soil Sci.* 38:65-70.
- Németh, K.; Mengel K. and Grimme, H. 1970. The concentration of K, Ca. and Mg in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca and Mg. *Soil Sci.* 109:179-185.
- Németh, K. 1975. The effect of K fertilization and K removal by raygrass in pot experiment on the K concentration of the soil solution of various soils. *Plant and Soil* 42:97-107.
- Onchere J.; Goulding, K. W. T.; Wood, I. G. and Catt, J. A. 1989. Potassium and magnesium in some Kenyan soils: their mineral sources and release to Ca-resin. *J. Soil Sci.* 40:621-634.
- Page, M. B. and Talibudeen, O. 1982. Critical potassium potentials for crops: 2. Potentials for wheat, maize, peas, beans and sugar beet in their early growth on a sandy loam. *J. Soil Sci.* 33:771-778.
- Poss R.; Fardeau, J. C.; Saragoni, H. and Quantin, P. 1991. Potassium release and fixation in Ferralsols (Oxisols) from Southern Togo. *J. Soil Sci.* 42:649-660.
- Rodríguez, S. J. y Galvis S. A. 1989. Dinámica del potasio en los suelos del país. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile. 137 p.
- Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Colección de Agricultura. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. Santiago de Chile, Chile. 291 p.
- Rodríguez, S. J.; Pinochet T. D. y Matus B. F. 2001. Fertilización de los cultivos. Lom (eds). Santiago de Chile. Chile. 117 p.
- Statistical Analysis Systems Institute (SAS Institute). 1999. SAS/STAT Software. Version 6. Statistical SAS Inst. Inc. Cary, NC., USA.
- Schouwenburg, J. Ch. and van Schuffelen, A. C. 1963. Potassium exchange behaviour of an illita. *Neth. J. Agric. Sci.* 11:13-22.
- Sharpley, A. N. 1987. The kinetics of soil potassium desorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 912-917.
- Sivasubramaniam, S. and Talibudeen, O. 1972. Potassium-aluminum exchange in acid soils: Kinetics. *J. Soil Sci.* 23:163-176.
- Sparks, D. L. and Jardine, P. M. 1984. Comparison of kinetic equations to describe potassium-calcium exchange in pure and mixed systems. *Soil Sci.* 1984:115-122.
- Sparks, D. L. 1987. Potassium dynamics in soils. *Adv. Soil Sci.* 6:1-63.
- Talibudeen, O. 1981. Cation exchange in soils. *In: The Chemistry of Soil Processes.* Greenland, D. J. and Hayes, M. H. B. (eds.) John Wiley & Sons, Ltd. UK. p. 115-177.
- van Noordwijk, M. and de Willigen, P. 1987. Quantitative root ecology as element of soil fertility theory. *Neth. J. Agric. Sci.* 34:273-281.
- Zeng Q. and Brown, P. H. 2000. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. *Plant and Soil* 221:121-134.