

**DOCTORADO EN CIENCIAS Y BIOTECNOLOGÍA DE
PLANTAS**

**Predicción de la absorción de potasio por las raíces de
chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)**

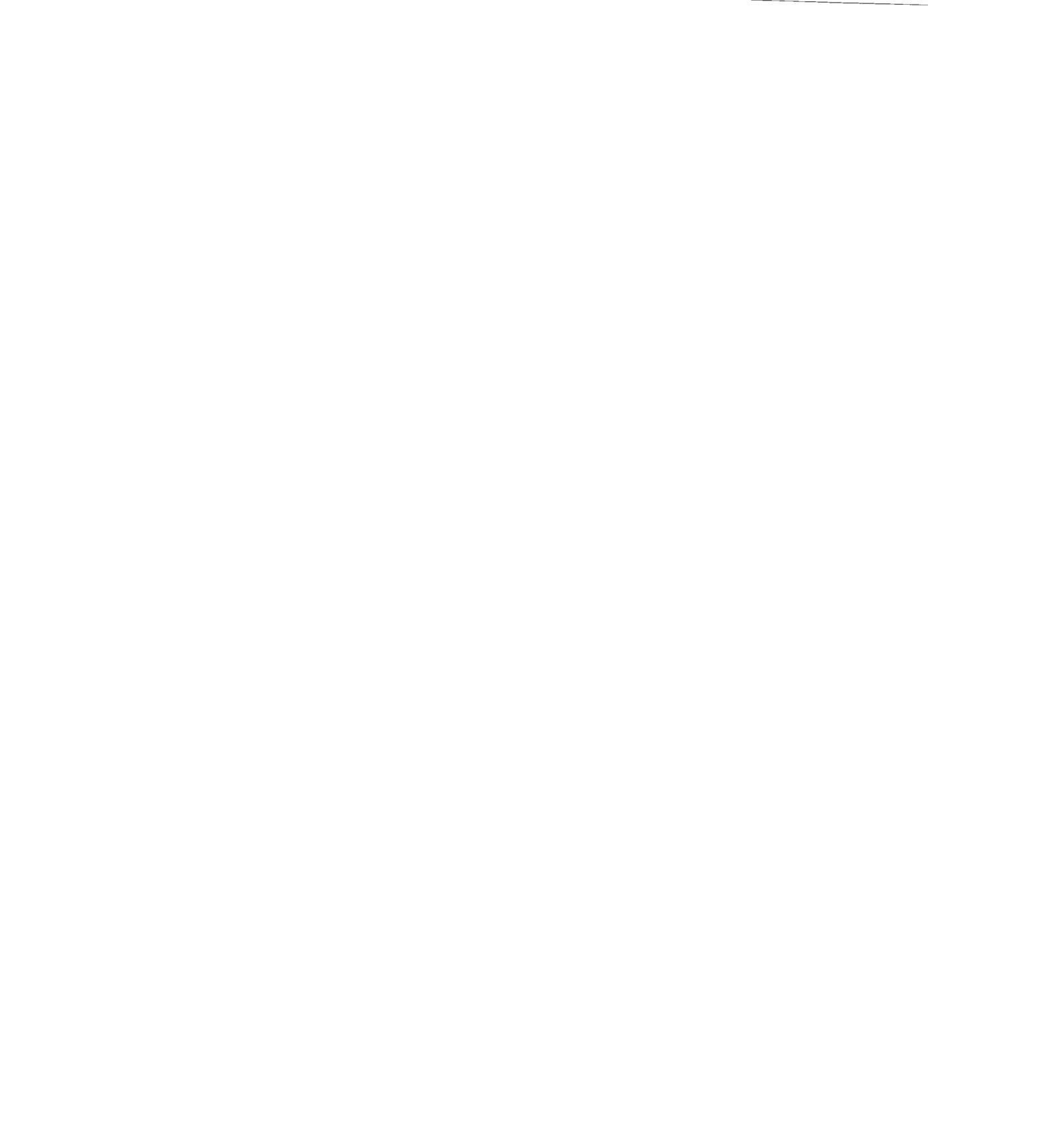
Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias
presenta:

Lizette del Carmen Borges Gómez



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Mérida Yucatán, México
2006



DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi amor, el alma y el corazón a...

A mis padres:

José Borges Lara

Minerva Gómez Garma de Borges[†]

***Mamá:** Guía mis pasos e ilumina mi camino, lléname de tu presencia hasta que se cumpla mi destino.*

A mi familia:

Fernando José Álvarez Cervera

Fernando Jesús Álvarez Borges

Valentina del Carmen Álvarez Borges

A mis hermanos:

María Eugenia

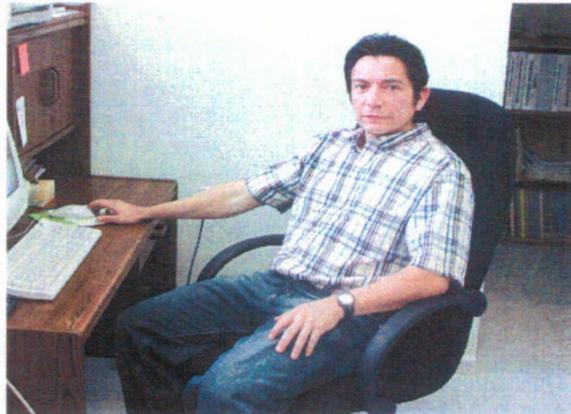
José Armando

Minerva

Hernán

*...y a ti **Señor** que tienes perfecto conocimiento, no sólo de cuanto digo o hago, sino también de mis pensamientos más secretos.*





*A la memoria del
Dr José Armando Escamilla Bencomo*

A veces somos agua, a veces somos aire y a veces somos tierra... La vida fluye.

CONTENIDO

Contenido	i
Reconocimientos	iii
Agradecimientos	v
Lista de Cuadros	vii
Lista de Figuras	ix
Resumen	xi
Abastract	xiii
I Introducción	
El potasio en la nutrición de las plantas	1
La disponibilidad del potasio contenido en el suelo	5
El cultivo del chile habanero	7
Los modelos de simulación en la toma de nutrimentos	10
Justificación del estudio	12
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Hipótesis	13
Referencias	14
Capítulo 1	
Potasio en suelos de Yucatán	
Resumen	21
Summary	22
Introducción	23
Materiales y Métodos	25
Resultados y Discusión	29
Conclusiones	36
Referencias	38
Capítulo 2	
Exchangeable potassium and potassium desorption in 16 soils from Yucatán	
Abstract	41
Introduction	42
Materials and methods	44
Results and discussion	46
Conclusions	60
References	61

Capítulo 3

Cinética de la absorción de potasio por las raíces de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

Resumen	65
Abstract	66
Introducción	67
Metodología	68
Resultados y discusión	71
Conclusiones	78
Referencias	79

Capítulo 4

Predicción de los requerimientos de K en la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en Yucatán

Resumen	83
Abstract	84
Introducción	85
Metodología	87
Resultados y discusión	92
Conclusiones	107
Referencias	108

Discusión general	111
Conclusiones generales	117
Consideraciones del estudio	119
Perspectivas	121

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se realizó en la Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. haciendo uso de sus equipos e instalaciones, bajo la asesoría del Dr. José Armando Escamilla Bencomo (q.e.p.d.) y en su momento del Dr. Tomás González Estrada.

El autor recibió beca-crédito No. 17205 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para realizar los estudios de Doctorado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de Trabajo.

A la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) y a la Dirección General Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA) por el estímulo brindado en la realización de mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que hizo posible mis estudios de posgrado.

Al hoy extinto Laboratorio de Raíces de la Unidad de Bioquímica y Biología Molecular del Centro de Investigación Científica de Yucatán, por poner a mi disposición sus instalaciones.

Al Laboratorio de Agua-Suelo-Planta del Instituto Tecnológico de Conkal por permitirme hacer uso de él.

A los miembros del comité tutorial, Dr José Armando Escamilla Bencomo, Dr Tomás González Estrada, Dr Manuel de J. Soria Fregoso, Dr Nicholas Comerford y Dr José Luis Andrade Torres, por su apoyo para alcanzar mis objetivos de estudio.

A los revisores Dr Tomás González Estrada, Dr Manuel de J. Soria Fregoso, Dr Nicholas Comerford, Dr José Luis Andrade Torres, Dr Ernesto Alcántar González, Dr. Manuel Martínez Estévez y Dr Felipe Vázquez Flota, por sus acertadas observaciones en la escritura del presente documento.

A la QFB Fátima Medina Lara y al IA Adolfo Guzmán Antonio por todo el apoyo brindado en la realización de los análisis de laboratorio.

A los compañeros y amigos del laboratorio: Manuela Tamayo, Fausto Quintal y Fernando Casanova

Por último, muy especialmente, al Dr Tomás González Estrada quien en ausencia del Dr José Armando Escamilla Bencomo me brindó desinteresadamente su apoyo para dar seguimiento y concluir con mis estudios de Doctorado.

.....Mil Gracias

LISTA DE CUADROS

Capítulo 1		página
Cuadro 1.1	Clasificación y ubicación de los suelos estudiados en el estado de Yucatán.	26
Cuadro 1.2	Características físicas y químicas seleccionadas de los suelos de Yucatán.	31
Cuadro 1.3	Contenido de K^+ intercambiable y soluble en diferentes suelos del estado de Yucatán.	34
Cuadro 1.4	Coefficiente de difusión efectiva (D_e) y poder amortiguador (b') en suelos de Yucatán.	35
Capítulo 2		
Table 2.1	Classification and location of sixteen soils from Yucatan, Mexico.	50
Table 2.2	Characteristics of the sampling sites.	51
Table 2.3	Physical and chemical properties of selected soils.	53
Table 2.4	Regression equation coefficients of cumulative potassium release (mmol kg^{-1}) from four sequential extractions with NH_4OAc .	54
Table 2.5	Desorption isotherms of potassium by cationic exchange membranes.	56
Capítulo 3		
Cuadro 3.1	Medidas de tendencia central y dispersión en el agotamiento de potasio, durante 210 min, por plántulas de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) en soluciones con diferentes concentraciones de potasio.	71
Cuadro 3.2	Comparación de medias de la velocidad máxima de absorción de K^+ (I_{max}) y constante de Michelis-Menten (K_m) en plantas de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) de 45 días de edad.	76

Capítulo 4

Cuadro 4.1	Producción de biomasa acumulada de chile habanero (kg ha^{-1}) en peso seco y extracción acumulada de K ($\text{K}_2\text{O kg ha}^{-1}$).	89
Cuadro 4.2	Parámetros de los suelos de Yucatán introducidos al modelo SSAND.	91
Cuadro 4.3	Características de la raíz y cinética de absorción de K^+ del chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) introducidos al modelo SSAND.	92
Cuadro 4.4	Frecuencia y dosis sugeridas en kg ha^{-1} de incorporación de K en suelos superficiales (< 25 cm) de Yucatán para la producción de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.).	98
Cuadro 4.5	Frecuencia y dosis sugeridas en kg ha^{-1} de incorporación de K en suelos profundos (> 35 cm) de Yucatán para la producción de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.).	99

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1		página
Figura 1.1	Desplazamiento de potasio en la solución de los suelos de Yucatán a capacidad de campo.	36
Capítulo 2		
Figure 2.1	Location of the soils in Yucatan, Mexico. 1, Akil; 2, Becanchen; 3, Buctzotz; 4, Cacalchen; 5, Celestun; 6, Chemax; 7, El Cuyo, 8, Maxcanu; 9, Peto; 10, San Isidro; 11, Tekit; 12, Telchac Pueblo; 13, Temozon; 14, Tizimin; 15, Tzacacab; 16, Xul.	44
Figure 2.2	Soils selected from Yucatan.	47
Figure 2.3	Relationship between potassium on soil phase (K_s) and potassium on soil solution (K_i) for three soils representing the range found for 16 soils: Lithic Rendolls (Becanchen and Temozon) and Lithic Usthortheints (Telchac Pueblo).	57
Figure 2.4	K^+ desorbed by the soil and adsorbed by CEMs, simulating the K^+ possibly absorbed by the roots.	59
Capítulo 3		
Figura 3.1	Evaluación del agotamiento de la absorción de K^+ por las raíces de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.).	69
Figura 3.2	Agotamiento de K^+ por plántulas de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) de 45 días de edad, en soluciones con diferente concentración de K^+ , después de haber sido sometidas a un período en ausencia de K^+ .	73
Figura 3.3	Cinética de absorción de K^+ por unidad de área superficial (cm^2) de raíz de plantas de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.), de 45 días de edad, en soluciones nutritivas con diferente concentración de K^+ .	74

Figura 3.4	Absorción de K^+ por plantas de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) de 45 días de edad.	77
Capítulo 4		
Figura 4.1	Diagrama de interacción de ejecución del modelo SSAND.	86
Figura 4.2	Menú principal de aplicaciones del modelo de simulación SSAND.	87
Figura 4.3	Introducción de datos de biomasa y de uso eficiente del nutrimento por la planta para ejecutar el modelo SSAND.	88
Figura 4.4	Parámetros utilizados en el modelo SSAND.	93
Figura 4.5	Aplicación para la introducción de los eventos de fertilización.	93
Figura 4.6	Demanda estimada de K por el cultivo de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) mediante el modelo de simulación SSAND, para una producción de 28 t ha^{-1} de fruto fresco.	94
Figura 4.7	Simulación de la producción de biomasa del cultivo de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) en suelos sin fertilización potásica.	95
Figura 4.8	Simulación de la demanda nutrimental (DN) y absorción de K en dos suelos con diferentes regímenes de fertilización potásica.	101
Figura 4.9	Porcentaje de incorporación de fertilizante potásico en diferentes etapas del cultivo para cubrir la demanda de K de acuerdo a la simulación de la toma del nutrimento.	102
Figura 4.10	Fertilización acumulada de K requerida para cubrir la demanda nutrimental del cultivo de chile habanero.	104
Figura 4.11	Distribución regional de los requerimientos de K para la producción de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) en Yucatán, de acuerdo al modelo de simulación de suministro de suelo y demanda nutrimental	106

RESUMEN

El chile habanero es un cultivo de gran importancia en el estado de Yucatán. Su producción se realiza en suelos cuyas características difieren de un sitio a otro. Independientemente del tipo de suelo, para su producción, se aplican altas cantidades de potasio (K). Esto se debe a la importancia de este mineral en la producción del cultivo ya que está directamente involucrado con la calidad de fruto. Sin embargo, se desconoce si el fertilizante aplicado es realmente aprovechado por la planta, debido a que no se ha evaluado la capacidad de suministro de K por los suelos, ni la capacidad de la raíz del chile habanero para absorber este mineral.

Para evaluar la capacidad de suministro de K se seleccionaron 16 suelos representativos del estado de Yucatán. Los suelos fueron caracterizados mediante el análisis de pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), textura, y la concentración de Calcio (Ca) y magnesio (Mg). Se determinaron el K soluble (K_{sol}) y el intercambiable (K_{int}) y una tercera forma del K del suelo (K de liberación lenta) fue evaluada mediante extracciones secuenciales. A partir de ello se determinó el coeficiente de partición de potasio (K_d) entre la fase sólida (K_s) y líquida (K_l) del suelo. Los valores obtenidos fueron utilizados para estimar la capacidad amortiguadora del suelo (b') y el coeficiente efectivo de difusión del K en el suelo (D_e).

Para evaluar la cinética de absorción de K por las raíces de chile habanero, se eligió la variedad criolla naranja por ser la que se cultiva en la región en mayor extensión. Con los valores de absorción de K durante 210 min y con la medición del área superficial de la raíz, se obtuvo la velocidad máxima de absorción (I_{max}) y la constante de Michaelis-Menten (K_m). Los contenidos de K en los suelos y la planta fueron analizados estadísticamente por análisis de varianza, correlación y comparación de medias.

Los datos del suelo y de la planta se utilizaron para predecir la absorción de K por las raíces de chile habanero utilizando el modelo de simulación SSAND (SOIL SUPPLY AND NUTRIENT DEMAND). De acuerdo a los resultados se definió la dosis y el momento oportuno de incorporación de K para cada suelo.

Los suelos estudiados mostraron diferencias significativas en los resultados de análisis de K_{sol} , K_{int} , K_d , D_e y b' . La relación entre K_{sol} y K_{int} fue baja ($r^2=0.6$). En suelos donde el K_{int} fue menor que 1.2 cmol kg^{-1} se observó una relación negativa con Ca y Mg ($r^2=0.74$), y solamente en suelos con contenido superior al 25% de arcilla se

observó estrecha relación entre ésta y el K_{int} ($r^2=0.9$). No se encontró relación de CIC y MO con el K_{int} . La CIC estuvo más relacionada con el porcentaje de MO ($r^2= 0.91$) que con el porcentaje de arcilla ($r^2=0.43$).

Las extracciones múltiples sobre un mismo suelo fueron necesarias para obtener el K_{int} total. Un promedio del 30% del K_{int} se obtuvo con las extracciones secuenciales, lo que indica que un porcentaje considerable de K es de lenta liberación. La comparación de los valores de K_d entre los suelos, fue estadísticamente significativa y la comparación de medias ubicó a los 16 suelos en 6 grupos.

En la evaluación de la cinética de absorción de K por las raíces de chile habanero hubo diferencias significativas para K_m pero no para I_{max} . La integración de las diferentes concentraciones dio un valor único de I_{max} $4.7 \times 10^{-4} \mu\text{M cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y de K_m 1.15 mM. En el rango de concentraciones evaluadas (de 2 a 8 mM) el mecanismo de absorción mostró ser de baja afinidad.

De acuerdo al modelo de simulación SSAND, los suelos evaluados requieren de la incorporación de K en dosis de 108 a 150 kg ha^{-1} . Al considerar la capacidad de suministro de los suelos y las características de la cinética de absorción de K por las raíces de chile habanero, el momento oportuno de incorporación de K al suelo fue fundamental, y con base en la simulación de demanda del cultivo y el suministro por el suelo, diferentes eventos de fertilización han sido propuestos para cada suelo.

ABSTRACT

Habanero pepper is an agricultural product of great importance in Yucatan. It is grown in soils whose characteristics differ from place to place. Regardless of the type of soil, large amounts of potassium (K) are applied to the habanero plants. This is due to the fact that this mineral is of utmost significance in the production of this kind of pepper, since it is directly involved in the quality of the fruit. However, it is not known whether the provided fertilizer is actually being used by the plant, given that neither the soil supply capacity nor the root absorption capacity for this mineral have been studied in habanero pepper.

In order to evaluate the supply capacity of K, sixteen representative soils from the state of Yucatan were selected. Soils were characterized using pH, organic matter (OM), cationic exchange capacity (CEC), texture, and calcium (Ca) and magnesium (Mg) concentration analyses. Soluble K (K_{sol}) and exchangeable K (K_{exch}), as well as a third form of soil K (slow release K) was evaluated by means of sequential extractions. Based on these results the partition coefficient for potassium (K_d) between the solid (K_s) and liquid (K_l) phases of the soil was determined. The obtained values were used to estimate the buffer capacity (b') and the effective diffusion coefficient of K in the soil (D_e).

With the purpose of evaluating the absorption kinetics of K by the roots of the habanero pepper a local orange-colored variety was chosen as it is the most widely grown type in the region. The rate of K absorption was obtained with the depletion technique, at various concentrations. Using the absorption values of K during 210 minutes and the surface area of the root, the maximum absorption velocity (I_{max}) and the Michaelis-Menten constant (K_m) were calculated. Statistical analyses of variance, correlation, and comparison of means were performed on the K content values in soils and plants.

Soil and plant data were used to predict the absorption of K by the roots of the habanero pepper by means of the SSAND (Soil Supply and Nutrient Demand) simulation model. In accordance with these results the dose and opportune moment of K application were determined for each soil.

The studied soils showed significant differences in the K_{sol} , K_{int} , K_d , D_e , and b' analyses results. The relationship between K_{sol} and K_{int} was low ($r^2 = 0.6$). In soils for which K_{int} was lower than 1.2 cmol kg^{-1} , a negative correlation with Ca and Mg was observed

($r^2 = 0.74$), while a close correlation between clay content and K_{int} ($r^2 = 0.9$) was found only in soils having more than 25% clay.

No association was found between CEC or OM and K_{int} . CEC was more closely related with the between CEC or OM and K_{int} . CEC was more closely related with the percentage of OM ($r^2 = 0.91$) than with the amount of clay ($r^2 = 43$).

Multiple extractions on a single soil were necessary in order to obtain the total K_{int} . An average of 30% of K_{int} was obtained with the sequential extractions, which indicates that a considerable percentage of K is of the slow release type. The comparison of K_d values reached statistical significance and the comparison of means sorted the 16 soils into 6 groups.

In the evaluation of the kinetic absorption of K by the roots of the habanero pepper, significant differences were found in K_m for the various concentration values of K, but not for I_{max} . The integration of the diverse concentration values produced a single I_{max} value of $4.7 \times 10^{-4} \text{ mM cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and a single K_m value of 1.15 mM. Due to the concentration range that was evaluated (from 2 to 8 mM), the absorption mechanism proved to be of low affinity.

According to the SSAND simulation model, the soils under evaluation require the addition of K at doses of 108 to 150 kg ha^{-1} . When considering the soil supply capacity and the root absorption kinetics of the habanero pepper, the timely moment for the incorporation of K to the soil is essential; based on the simulation of crop demand and soil supply, various fertilization events have been proposed for each soil.

INTRODUCCIÓN

EL POTASIO EN LA NUTRICIÓN DE PLANTAS

El K es el séptimo elemento más común en la corteza terrestre (Sheldrick, 1985) y es el catión más abundante en las plantas, por lo que es absorbido en grandes cantidades por las raíces (Leonard, 1985). De aquí la importancia de los estudios de su disponibilidad en el suelo y de los mecanismos de absorción por las plantas.

Las especies cultivadas consumen una apreciable cantidad de K durante su ciclo de vida y en general, a excepción del N, las plantas requieren mayor cantidad de K durante su ciclo de vida que cualquier otro mineral. En términos generales, todos aquellos cultivos cuya cosecha son frutos, flores u órganos de acumulación, requieren altas cantidades de K (Bertsch & Thomas 1985; Marschner, 1995; Heckman *et al.*, 2003).

Las plantas con suministro adecuado de K son más resistentes y tolerantes a las plagas y enfermedades debido a que responden al ataque de parásitos a través de la formación de barreras mecánicas (lignificación) y la síntesis de toxinas (fitoalexinas) (Marschner, 1995). Velasco (1999) señala que plantas aún enfermas, con una nutrición adecuada pueden resistir más al efecto de patógenos, lo cual se traduce en un mejor desarrollo y rendimiento de las plantas. Por el contrario, la deficiencia de K, se manifiesta visualmente en las hojas más antiguas. En dicotiledóneas, estas hojas son en un principio cloróticas, especialmente cerca de lesiones necróticas que aparecen rápidamente. En monocotiledóneas, las células de puntas y márgenes de las hojas mueren primero y la necrosis aparece a lo largo de los márgenes y hacia la base de la hoja (Salisbury & Ross, 1992).

En cuanto a la calidad de las cosechas, numerosos estudios en forrajes, granos y especies hortícolas, han sido conducidos para evaluar el efecto favorable del K sobre la calidad de los frutos (Usherwood, 1985; Burgarín-Montoya *et al.*, 2002; Pettigrew, 2003)

Funciones del K en las plantas

El K^+ es un activador de muchas enzimas que son esenciales en la fotosíntesis y en la respiración, además de activar enzimas necesarias para la síntesis de almidón y de proteínas (Blevins, 1985; Marschner 1995; Leigh, 2001). Entre las funciones básicas del K^+ están la osmoregulación, neutralización de grupos aniónicos y control de la polarización de las membranas celulares (Véry & Sentenac, 2003).

En las células y en ciertos tejidos, la presión y la turgencia están dados, en un principio, por el transporte de solutos y por el balance de agua en las plantas provocados por el mecanismo de extensión celular y por varios tipos de movimientos. La extensión celular se debe al tamaño de la vacuola la cual ocupa del 80 al 90% del volumen total de la célula. Para que ocurra la extensión celular es indispensable un incremento de extensión de la pared celular y de la acumulación de solutos para crear un potencial osmótico interno. La extensión celular es consecuencia de la acumulación de K^+ en las células, lo cual es requerido tanto para incrementar el potencial osmótico (valores más negativos) en las vacuolas como para estabilizar el pH en el citoplasma (Marschner, 1995).

La apertura de los estomas se debe a que las células guarda absorben agua, lo que a su vez es causado por el aumento de K^+ y por consiguiente por un potencial osmótico más negativo. Los iones K^+ se mueven hacia las células oclusivas, provenientes de las células que lo rodean a medida que los estomas se abren (Salisbury & Ross, 1992). El cierre de los estomas en la oscuridad se debe a la salida de K^+ y el correspondiente decremento de la presión osmótica (Marschner, 1995). Al actuar el K^+ como regulador de la presión osmótica celular hace disminuir la transpiración contribuyendo así a mantener la turgencia celular. Cuando hay una deficiencia de K, la turgencia disminuye, aunque la planta tenga exceso de agua a su disposición (Navarro y Navarro, 2000).

En el mantenimiento del pH óptimo en las células, el K^+ actúa básicamente neutralizando los ácidos orgánicos resultantes del metabolismo y asegurar así la concentración en H^+ del jugo celular. Es debido a su alta concentración en citosol y cloroplasto que el K^+ neutraliza los aniones solubles e insolubles estabilizando el pH entre 7 y 8, óptimo para la mayoría de las reacciones enzimáticas.

Absorción de potasio por las plantas

La fuente inmediata de K para los cultivos es la solución del suelo, en consecuencia, su aprovisionamiento depende de su concentración en las inmediaciones de las raíces, de su velocidad de transporte a través de la solución a la superficie radicular, de la renovación de la solución por desorción a partir de las superficies adsorbentes y de la extensión que alcanza la ramificación radicular en el suelo. La ramificación radicular es importante porque afecta a la distancia de transporte del K^+ en la solución del suelo; por ejemplo, Chen & Gabelman (2000) reportaron que el mecanismo que facilita la adquisición de K del tomate var. 576 se debe al crecimiento rápido de la longitud de raíz y en consecuencia, de la superficie del área de contacto, aún cuando ésta no se caracterice por tener alta capacidad de absorción de K^+ .

De acuerdo a Barber (1984), las plantas normalmente ocupan menos del 1 al 2% del volumen del suelo, por tanto solo entran en contacto cuando mucho con el 1 o 2% del K disponible en el suelo. El movimiento de los nutrimentos desde un punto del suelo hasta el interior de la planta implica el desplazamiento del nutrimento desde la masa del suelo hasta la superficie de la raíz. Este movimiento puede ocurrir por dos procesos: difusión y flujo de masas. El flujo de masas ocurre porque las raíces absorben agua para compensar la pérdida en la transpiración y conforme el agua se mueve hacia la raíz, los iones disueltos son transportados a la superficie de ésta. La difusión se da cuando los iones se mueven en un gradiente de concentración establecido entre la superficie de la raíz y el conjunto del suelo (Comerford, 1999).

Epstein & Hagen (1952) introdujeron el concepto de la cinética enzimática para explicar el estudio de la velocidad de absorción de un ión por las raíces en función de su concentración, del transporte de iones y del funcionamiento de los transportadores. Esta hipótesis se basa en el hecho de que cinéticamente el proceso de catálisis enzimática y del transporte de iones a través de las membranas celulares son similares, y se fundamenta en la unión transitoria de los sustratos a los sitios activos como puede ocurrir entre el ión en solución y el transportador de iones al interior de la raíz celular. En concentraciones crecientes del sustrato (o del ión) se observa una cinética de saturación; en la que a concentraciones suficientemente altas, la velocidad de la reacción (o velocidad de absorción del ión) se vuelve independiente de ella. La velocidad de la absorción esta dada por la siguiente ecuación de Michaelis-Menten:

$$V = V_{\max} \frac{[M]}{[M] + K_m}$$

donde: V , es la velocidad de absorción (cantidad de ión absorbido por cm de raíz por unidad de tiempo); V_{max} , la velocidad máxima de absorción, (valor asintótico cuando todos los transportadores estarían funcionando); M , la concentración externa del ión; y K_m , la constante de Michaelis-Menten (medida de la afinidad de los acarreadores del ión que es igual a la concentración del ión necesaria para alcanzar la mitad de V_{max}).

Mecanismos de absorción de K por las células de la raíz

El plasmalema y el tonoplasto son las principales biomembranas involucradas en la absorción y transporte de solutos en la raíz, ambas funcionan como una barrera efectiva en contra de la difusión de solutos y su capacidad de transporte y su regulación esta muy relacionada con su composición química y estructura molecular (Nobel, 1991).

No todos los iones se transportan a través del plasmalema de la misma forma o a través del mismo tipo de proteína. Algunos son transportados y acumulados en condiciones cercanas al equilibrio, otros se transportan y se acumulan muy por encima o muy por debajo del mismo. En el primer caso se habla de transporte pasivo o difusivo; en el segundo, de transporte activo.

La absorción de iones por un transporte pasivo (difusión) ocurre a favor de un gradiente de potencial electroquímico y obedecen a las leyes de Fick, y a las ecuaciones de Nernst, Ussing-Teorell y Goldman. Por otro lado, el transporte activo de iones requiere de energía que suministra el metabolismo celular, debido a que su movimiento neto es en contra de un gradiente de concentración, o de un potencial electroquímico.

El paso de K^+ a través del plasmalema y el tonoplasto resulta de un transporte activo y pasivo. Epstein *et al.* (1963) y Wech & Epstein (1968) demostraron que a concentraciones externas aproximadamente menores a 1 mM, la absorción de K^+ por la membrana plasmática es mediada por un mecanismo de alta afinidad llamado también Sistema I, con valor de K_m bajo. Por otro lado un mecanismo menos selectivo llamado Sistema II opera a altas concentraciones externas de K y en consecuencia con valor de K_m alto. Según Epstein (1976) los sistemas I y II se localizan en paralelo en el plasmalema formando un modelo bicompartimental. A bajas concentraciones (0.2 mM o menos) operaría el mecanismo I, y al margen de altas concentraciones intervendría en paralelo el mecanismo II.

Termodinámicamente existen tres tipos de proteínas de transporte: bombas, transportadores y canales. Las bombas utilizan la energía química del ATP, y los transportadores y canales utilizan el gradiente electroquímico de los iones. Dependiendo de la concentración externa de K^+ , la absorción de iones ocurre a través de diferentes mecanismos de transporte. El mecanismo dual de transporte de K, propuesto inicialmente por Epstein en 1972, fue demostrado en células corticales de raíces por Maathuis & Sanders (1996) quienes señalaron que el sistema de alta afinidad es llevado a cabo por acarreadores identificados como K^+/H^+ antiporte, y por otro lado el mecanismo de baja afinidad es mediado por un transporte pasivo de canales selectivos de K^+ . No obstante, Véry & Sentenac (2003) señalan que al igual que los acarreadores con un mecanismo de alta afinidad, algunos canales trabajan a concentraciones milimolares de K^+ y no está claro que los canales jueguen un papel en ambos mecanismos (alta y baja afinidad de K^+). Por otra parte, la caracterización de transportadores de K^+ en un sistema heterogéneo indica que éstos no tienen un papel preponderante entre un mismo rango de concentraciones de K^+ . En otras palabras, es común que transportadores y canales contribuyan a la toma de K^+ por las células vegetales y que los dos tipos de sistemas de transporte sean poco diferentes con relación a la afinidad de transporte como inicialmente se pensó.

LA DISPONIBILIDAD DEL POTASIO CONTENIDO EN EL SUELO

Suministro de K por el suelo

El concepto de la fertilidad del suelo ha sido mal interpretado, y en el contexto de nutrición de un cultivo se usa el término de "suelo fértil" como aquel que puede proporcionar los nutrimentos esenciales para obtener la mejor producción. Esto ha dado como resultado un uso excesivo de los fertilizantes químicos y tal pareciera que basta con la incorporación de los fertilizantes (nutrimentos) para que un suelo sea fértil. En realidad la nutrición de los cultivos está determinada por varios factores, entre los que se encuentran no solo la disponibilidad de nutrimentos en el medio donde se desarrollan las plantas, sino también por los mecanismos que tienen las plantas para absorber los mismos (Barber, 1984; Tinker & Nye 2000).

Comerford (1999) describe la fertilidad del suelo como el "estatus del sistema suelo planta", definido por la capacidad para proporcionar los nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas, a través de mecanismos de: i) liberación de nutrimentos de la fase sólida a la fase soluble, ii) movimiento de los nutrimentos a través de la solución del suelo hacia las raíces de las plantas y iii) la absorción por las raíces.

Los suelos más ricos pueden no ser capaces de suministrar suficiente K para satisfacer la demanda por el cultivo. El problema puede no ser de contenido total, sino de la concentración de la solución del suelo en la zona radicular y de la velocidad de su renovación. En función de su aprovechamiento por las plantas, el K puede ser clasificado en tres categorías: i) K no asimilable, ii) K lentamente asimilable y iii) K rápidamente asimilable (Wild, 1989).

La mayor parte del K del suelo está casi siempre en formas no asimilables, formando parte de la estructura y redes cristalinas de minerales primarios y secundarios. Únicamente con los procesos del intemperismo físico y químico, los minerales pueden sufrir una gradual degradación y dar lugar a formas aprovechables de K (Sparks y Huang, 1985; Navarro y Navarro, 2000). El K lentamente asimilable es el que se encuentra atrapado en las láminas cristalinas de minerales y no puede ser reemplazado por un proceso de cambio común, y sólo por la acción de determinadas condiciones puede liberarse muy lentamente, situándose en posición de intercambiable. Únicamente del 1 al 2 % del K total se encuentra en forma asimilable en la disolución del suelo o como intercambiable en los coloides. Cuando las plantas toman el K de la solución del suelo, el K adsorbido a los coloides se libera y repone el K de la solución (Cox *et al.*, 1999; Comerford, 1999). De tal forma, que a través del intercambio catiónico, el K está continuamente disponible para las plantas. Los procesos de adsorción y desorción de K en las superficies de cambio ocurren sólo si el suelo contiene suficiente K (Wild, 1989) y depende, además, de diversas características físicas y químicas del suelo.

EL CULTIVO DE CHILE HABANERO

Importancia del cultivo del chile

El género *Capsicum* incluye un promedio de 25 especies y tiene su centro de origen en las regiones tropicales y subtropicales de América, probablemente en el área Bolivia-Perú, donde se han encontrado semillas de formas ancestrales de más de 7000 años y desde donde se habría diseminado a toda América (Andrews 1995; Nuez *et al.*, 1996). Después del descubrimiento de América, todas estas especies principalmente *Capsicum annuum*, han sido llevadas a distintas regiones del mundo y rápidamente han pasado a ser la principal "especia" o condimento de comidas típicas de muchos países. La producción de chile en el mundo se localiza principalmente en China, México, Turquía, España, Estados Unidos, Nigeria e Indonesia.

México es el país del mundo con la mayor variedad genética de *Capsicum*; sin embargo, las estadísticas lo ubican en el 5º lugar de producción por unidad de superficie cultivada, después de España, Estados Unidos, Turquía y China, debido a los bajos rendimientos que oscilan alrededor de 13 toneladas por hectárea (FAO, 2005). Siendo la causa principal el nivel de tecnología de producción y el uso de cultivos criollos.

La riqueza genética del chile en México se debe en gran parte a la diversidad de climas y suelos, pero también a las prácticas tradicionales de cultivo que llevan a cabo los pequeños productores utilizando las semillas de los frutos seleccionados de las plantas nativas (Latournerie *et al.*, 2002). Todos los chiles son del género *Capsicum* de la familia de las Solanáceas. Los estudios taxonómicos coinciden en que son cinco las especies cultivadas: *Capsicum baccatum*, *C. chinense*, *C. pubescens*, *C. frutescens* y *C. annuum*. El chile habanero (*C. chinense*) y el manzano (*C. pubescens*) son originarios de Sudamérica pero en México son ampliamente conocidos, especialmente en las regiones donde se cultivan: el habanero en Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Tabasco; el manzano, también conocido como ciruelo o perón, sólo prospera en lugares altos que superen los 2000 msnm como en la Sierra de Puebla, en Veracruz, en Chiapas y en algunas zonas de Michoacán (Nuez *et al.*, 1996).

A pesar de ser un producto tradicional y culturalmente importante en nuestro país, el chile es poco estudiado en México. Es sorprendente el hecho de que en otros países del mundo, tanto instituciones públicas como privadas, estén instrumentando programas prioritarios de investigación con esta especie. Es en otros países donde un

gran número de investigadores se dedican al estudio de los *Capsicum*, no sólo para lograr variedades mejoradas sino para estudiar los aspectos nutricionales, biomédicos, bioquímicos, e industriales, así como su comercialización interna y hacia el exterior.

Producción del chile habanero en Yucatán

Hasta hace poco se creía que el chile habanero se producía únicamente en la Península de Yucatán, pero se ha hecho evidente que países como Honduras, Belice Guatemala y Perú producen igualmente chile habanero de buena calidad. En México, además del estado de Yucatán lo producen Tabasco, Chiapas, Veracruz, Tamaulipas, Baja California Norte, Morelos, Sonora, Guanajuato, Sinaloa y Jalisco (Soria *et al.*, 2002). Sin embargo, aunque no existe un documento serio que lo compruebe, se considera que las características del chile habanero producido en Yucatán son únicas, refiriéndose principalmente al picor o pungencia del fruto; es por ello, que en Yucatán, el cultivo del chile habanero ocupa el segundo lugar en importancia después del tomate.

Dada las características del chile habanero producido en Yucatán el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) otorgó a Yucatán la "Marca Colectiva" del chile habanero, al menos durante los siguientes diez años, en busca de una denominación de origen. Por lo que ahora la marca "chile habanero" de Yucatán esta protegida a nivel internacional por el Convenio de París firmado por México en 1903, así como por la Organización Mundial de Comercio (OMC). Esto le permitirá al chile habanero de Yucatán distinguirse de otros chiles que se producen en el país y en el mundo, en especial en Asia, donde es común que se realicen experimentos para homologar las especias que luego se comercializan en grandes volúmenes (Milenio, 2004).

Tun (2001) señala que Yucatán cuenta con una superficie total de 4'582,954 ha con potencial productivo de chile habanero, de las cuales 416,907 ha corresponden a suelos con alto potencial productivo. Esto quiere decir, que con una producción promedio de 10 ton ha⁻¹, Yucatán podría producir un poco más de 4 millones de toneladas de chile habanero cuando menos una vez al año. En realidad, la producción actual de chile habanero no cubre muchas veces ni la demanda local necesaria para la producción de salsas y condimentos.

Nutrición mineral de chile habanero

Definir las necesidades nutrimentales ha sido uno de los principales problemas al que se han enfrentado los productores de la región. La absorción de los nutrimentos para las plantas está determinada por varios factores, entre los que se encuentran los que afectan la facultad del medio donde se desarrollan las plantas para proporcionar los nutrimentos; y los que afectan la facultad de las plantas para absorber los mismos.

Las propiedades dinámicas que presenta el medio en el cual se desarrollan las plantas son de gran importancia en la disponibilidad nutrimental. Sin embargo, la generación de recomendaciones de fertilización de los cultivos se ha basado principalmente en los resultados de experimentación de prueba y error desarrollados en el campo.

La nutrición de chile se conoce ampliamente para *C. annum* (Rincón, *et al.* 1995; Johnson & Decoteau, 1996; Estrada *et al.*, 1998; Bar-Tal *et al.*, 2001a, 2001b). En contraste para *C. chinense*, no se han documentado trabajos serios que evalúen la demanda nutricional del cultivo y, en general, la mayoría de los estudios realizados del género *Capsicum*, han sido sobre la importancia y factores que afectan el contenido de capsaicinoides (Ochoa-Alejo & Gómez-Peralta, 1993; Collins *et al.*, 1995; Bernal *et al.*, 1995; Sudhakar & Ravishankar 1996; Contreras & Yahia, 1998; Estrada *et al.*, 1999).

Algunas recomendaciones generadas de diferentes trabajos de investigación sobre los requerimientos nutricionales de *C. chinense* en Yucatán señalan el uso de diferentes tratamientos de fertilización para obtener los mejores rendimientos de fruto. Así, para K, cuya importancia nutricional en los cultivos se debe a que influye directamente con la calidad y rendimiento de fruto se han propuesto aplicaciones al suelo que van desde 50 kg ha⁻¹ hasta 300 kg ha⁻¹ (Soria *et al.*, 1995, Reyes, 1997; Ayala *et al.*, 1998; Tun 2001, Soria *et al.*, 2002; López, 2003; Cervantes 2003). No obstante, se conoce por demás, que los resultados en campo no son del todo satisfactorios.

LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE LA TOMA DE NUTRIMENTOS

Los modelos de simulación de absorción de nutrientes y sus aplicaciones

La relación entre los estudios de la fisiología de la planta y los estudios del suelo ha sido considerada por diferentes autores (Silberbush & Barber, 1984; Le *et al.*, 1998, Comerford, 1999; Tinker & Nye, 2000), señalando la importancia tanto de la distribución de un nutriente y su movilidad en el suelo o en un sustrato, como en la capacidad de toma, distribución y arquitectura de la raíz, ambos necesarios en los modelos de nutrición.

Los modelos de absorción de nutrientes por plantas constituyen una herramienta útil para aumentar la eficiencia de las investigaciones en la nutrición de cultivos. Conceptualmente su uso permite enfatizar la investigación basada en los procesos y en el estudio de mecanismos de absorción, en lugar del método de prueba y error de la experimentación en el campo.

El uso de los modelos matemáticos en la absorción de nutrientes y desarrollo de raíces ha sido posible debido a las aplicaciones de la cinética enzimática para describir la dependencia de la concentración de nutrientes para su absorción por las raíces y el estudio de la movilidad de estos en el suelo para describir su transporte hacia la raíz (Barber, 1984; Tinker & Nye, 2000).

De acuerdo a Van Rees *et al.* (1990), aún cuando las condiciones varían según el sitio y la especie vegetal, teóricamente los procesos que gobiernan la absorción de nutrientes son aplicables a todos los suelos y especies vegetales. Estos procesos pueden clasificarse en dos grandes grupos: i) los procesos involucrados en la disponibilidad de nutrientes presentes en el suelo y ii) y los procesos involucrados en la absorción de nutrientes por la superficie radicular. Ambos casos pueden ser considerados utilizando los conceptos básicos de difusión y flujo de masas.

En este contexto, la predicción de la absorción de nutrientes requiere de la evaluación de parámetros del suelo y de la planta relacionados con la absorción y desarrollo radicular. Tanto la absorción de nutrientes como la del agua están influenciadas por las condiciones presentes en la interfase suelo-raíz (Escamilla *et al.*, 1991; Sauerbeck & Helal, 1990; Peterson & Cholewa, 1998), por ello es necesario cuantificar los parámetros de suelo y plantas que afectan dicha absorción.

Los parámetros del suelo más importantes relacionados con la absorción de nutrientes son:

C_1 = Concentración de nutriente en la solución del suelo

b' = Capacidad amortiguadora del nutriente en la solución del suelo asociado con la fase sólida de éste

D_e = Coeficiente de difusión efectiva

Los parámetros más importantes de la planta relacionados con la absorción de nutrientes son:

v = tasa de absorción de agua

L = longitud total de la raíz

r = radio de la raíz

k = tasa de crecimiento radicular

I = tasa de absorción del nutriente dado por la concentración en la superficie radicular

α = capacidad de absorción con relación a C_1

I_{max} = tasa máxima de absorción cuando C_1 no es limitante

K_m = Coeficiente de Michaelis que es igual al valor de C_1 necesario para llevar a tasa de absorción del nutriente (I) a $\frac{1}{2}$ de I_{max}

C_{min} = concentración mínima del nutriente en la solución del suelo

Los parámetros C_1 , b' , D_e y v determinan la tasa del transporte del nutriente a la raíz y los parámetros L , r y k determinan las características morfológicas de la raíz relacionadas con la superficie aérea y sus modificaciones con el tiempo. Por otra parte los parámetros I , α , I_{max} y K_m describen la dependencia de la absorción de la raíz con la concentración del nutriente en la solución del suelo, y por último, C_{min} expresa la concentración mínima del nutriente para que este pueda ser absorbido.

En este estudio, se utilizó el modelo SSAND (Soil Supply and Nutrient Demand), que es un modelo mecanístico que simula el desarrollo del cultivo para diagnosticar limitaciones de nutrición y determinar los regímenes de fertilización necesarios para alcanzar las metas de producción. Se basa en los procesos que controlan la absorción

de nutrimentos por las raíces de la planta y en los factores involucrados en el suministro de nutrimentos por el suelo (Li y Comerford, 2000). Los cálculos de absorción de nutrimentos son con base al crecimiento radicular (longitud y diámetro), cinética de absorción del nutrimento por la raíz y la capacidad suministro del nutrimento por el suelo.

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Con lo anteriormente descrito, queda implícita la importancia del cultivo de chile habanero en Yucatán. No obstante, los pocos estudios enfocados a evaluar los requerimientos minerales, dichos estudios no consideran las características de la planta y la capacidad de los suelos para su producción. Esto ha generado confusión al momento de definir la mejor dosis de incorporación de nutrimentos, ya que se ha observado una variabilidad de respuestas en el campo.

La importancia del K en el rendimiento y calidad de las cosechas ha generado diferentes recomendaciones para su incorporación al suelo. Sin embargo, se desconoce si en la realidad el K adicionado al suelo es aprovechado por el cultivo. Hasta este momento, no existe información que describa la capacidad de las raíces de chile habanero para absorber el K del suelo.

Por otra parte, no se ha evaluado la capacidad de los suelos para suministrar K, ya que el diagnóstico de la fertilidad de estos, se ha limitado a cuantificar su contenido en el suelo y no a evaluar los procesos que involucran la capacidad de los suelos para proveer el nutrimento. La cinética de absorción de K por las raíces de chile habanero y la capacidad del suelo para suministrar K, son parámetros susceptibles de evaluarse y ser utilizados en los modelos de simulación. Dichos modelos, permiten simular la absorción del K por las raíces cuando éste es incorporado al suelo y conocer si la cantidad de K incorporada cubre la demanda del cultivo.

En el presente trabajo se evaluaron los parámetros involucrados en la disponibilidad de K en suelos de 16 regiones de Yucatán y la cinética de absorción por las raíces de chile habanero. Estos fueron utilizados en un modelo de simulación de absorción de K para predecir su comportamiento en el campo y finalmente sugerir las dosis y el

momento oportuno de incorporación de K apropiadas para cada tipo de suelo. Para el desarrollo del trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Predecir los requerimientos de potasio en la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) con base en la disponibilidad del suelo y en la capacidad de absorción de la planta.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Conocer la disponibilidad de K en suelos de zonas productoras de chile habanero en el estado de Yucatán.

Estudiar la capacidad de absorción de K por las raíces de chile habanero.

Utilizar el modelo SSAND (Soil Supply and Nutrient Demand) para predecir la absorción de K y generar una recomendación para la aplicación de fertilizante.

HIPÓTESIS

La fertilización necesaria de K para chile habanero depende de su disponibilidad en el suelo. Por lo tanto, este conocimiento y el de los patrones de absorción de K por la planta permitirán un uso más eficiente de fertilizantes en los suelos de Yucatán

REFERENCIAS

- Andrews J. 1995. Peppers. The domesticated Capsicums. University of Texas Press, Austin. USA. 186 p.
- Ayala S., Soria M., y Borges L. 1998. Respuesta del chile habanero (*Capsicum chinense*) a la aplicación de diferentes niveles de NPK en fertirrigación. Resumen. *En: IX Congreso de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario*. Yucatán, México. p. 141.
- Barber S. A. 1984. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley & Sons. New York. 398 p.
- Bar-Tal A., Aloni B., Karni L., Osrovitz J., Hazan A., Itach M., Gantz S., Avidan A., Posalski I., Tratkovski N., and Rossenberg R. 2001a. Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. I. Effects of nitrogen concentration and $\text{NO}_3\text{:NH}_4$ ratio on yield, fruit shape, and the incidence of blossom-end rot in relation to plant mineral. *HortsScience*. 36 (7): 1244-1251.
- Bar-Tal A., Aloni B., Karni L., and Rossenberg R. 2001b. Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. II Effects of nitrogen concentration and $\text{NO}_3\text{:NH}_4$ on growth, transpiration, and nutrient uptake. *HortScience*. 36 (7): 1252-1259.
- Bertsch P. M., and Thomas G. W. 1985. Potassium status of temperate region soils. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp. 131-162.
- Bernal M. A., Calderón A. A., Ferrer M. A., Merino de Casares F., and Barceló A. R. 1995. Oxidation of capsaicin and capsaicin precursors by the basic peroxidase isoenzyme B₆ from hot pepper. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 43: 352-355.
- Blevins D. G. 1985. Role of potassium in protein metabolism in plants. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of American. Soil Society of America. Madison, USA. pp. 413-424.
- Burgarin-Montoya R., Galvis-Spinola A., Sánchez-García P., y García-Paredes D. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra*. 20: 391-399.

Cervantes C. L. 2003. Contenido de capsaicina en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) bajo condiciones de humedad y nutrición. Tesis Maestría. CIGA ITA 2. Conkal, Yucatán. México.

Chen J., and Gabelman W. H. 2000. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency. *Scientia Horticulturae* 83: 213-225.

Clarkson D., and Hanson J. B. 1980. The mineral nutrition of higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31: 239-298.

Collins M. D., Mayer L. M., and Bosland P. W. 1995. Improved method for quantifying capsaicinoids in *Capsicum* using high-performance liquid chromatography. *HortScience* 30(1): 137-139.

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. *En: Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos.* Orellana R., Escamilla A., y Larqué A. (eds). Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán. México. pp. 127-135.

Contreras P. M., and Yahia E. M. 1998. Changes in capsaicinoids during development, maturation, and senescence of chile peppers and relation with peroxidase activity. *J. Ag. Food Chem.* 46: 2075-2079.

Cox A. E., Joern B. C., Brouder S. M., and Gao D. 1999. Plant available potassium assessment with modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 902-911.

Epstein E., and Hagen C. E. 1952. A kinetic study of absorption of alkali cations by barley roots. *Plant Physiol.* 27: 457-474.

Epstein E., Rains D. W., and Elzam E. O. 1963. Resolution of dual mechanisms of potassium absorption by barley roots. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 49: 684-692.

Epstein E. 1972. Mineral nutrition of plant. Principles and perspectives. Wiley. New York. 412 p.

Epstein E. 1976. Kinetics of ion transport and the carrier concept. *In: Encyclopedia of plant physiology.* U. Luttge and M. G. Pitman (ed). New series. Vol 2. Part B. Springer-Verlag. New York. pp. 70-94.

- Escamilla J. A., Comerford N. B., and Neary D. G. 1991. Spatial pattern of slash pine roots and its effect on nutrient uptake. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 55: 1716-722.
- Estrada B., Pomar F., Díaz J., Merino F., and Bernal M. A. 1998. Effects of mineral fertilizer supplementation on fruit development and pungency in Padrón peppers. *J. Hort. Sci. & Biotechnology.* 73(4): 493-497.
- Estrada B., Pomar F., Díaz J., Merino F., and Bernal M. A. 1999. Pungency level in fruits of the Padrón pepper with different water supply. *Scientia Horticulturae.* 81: 385-396.
- FAO.2005. Datos Agrícolas de FAOSTAT. [En línea] Disponible: <http://faostat.fao.org/faostat/form?collection=Production.Crops.Primary&Domain=Production&servlet=1&hasbulk=&version=ext&language=ES>
- Heckman J. R., Sim J. T., Beegle D. B., Coale F. J., Herbert S. J., Bruulsema T. W., and Bamka W. J. 2003. Nutrient removal by corn grain harvest. *Agronomy J.* 95: 587-591.
- Johnson C., and Decoteau D. R. 1996. Nitrogen and potassium fertility affects jalapeño pepper plant growth, pod yield, and pungency. *Hort. Science* 31(7): 1119-1123.
- Latournerie M. L., Chávez J. L., Pérez M., Castañón G., Rodríguez S. A., Arias L. M., y Ramírez P. 2002. Valoración *in situ* de la diversidad morfológica de chiles (*Capsicum annum* L. y *Capsicum chinense* Jacq.) en Yaxcaba, Yucatán. *Fitotec. Mex.* 25(1): 25-33.
- Le Bot J., Adamowics S., and Robin P. 1998. Modeling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae.* 74: 47-82.
- Leigh R. A. 2001. Potassium homeostasis and membrane transport. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 193-198.
- Leonard R. T. 1985. Absorption of potassium into root cell. *In: Potassium in Agriculture.* R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp 327-336.
- López C. R. 2003. Disponibilidad de N, P y K en cinco sustratos para producción de *Capsicum chinense* Jacq. Tesis Maestría. CIGA ITA 2. Conkal, Yucatán. México.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed Academic Press. London, U.K. 889 p.

Maathuis F. J., and Sanders D. 1996. Mechanism of potassium by higher plant root. *Physiolgia Plantarum*. 96: 158-168.

Milenio. Periódico. Febrero 23 del 2004. Sección: Tendencias. [En Línea] Disponible: http://www.impi.gob.mx/impi/jsp/indice_all.jsp?OpenFile=docs/promocion/not_febrero/sintfeb23.html:

Navarro S., y Navarro G. 2000. Química agrícola. Mundi-Prensa. España pp. 251-271.

Nobel P. S. 1991. Physicochemical and environmental plant physiology. Academic Press, Inc. USA. 635 p.

Nuez V. J., Gil O. R., y Costa J. 1996. El cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 586 p.

Ochoa-Alejo N., and Gómez-Peralta J. U. E. 1993. Activity of enzymes involved in capsaicin biosynthesis in callus tissue and fruits of chilli pepper (*Capsicum annuum* L.). *J. Plant Physiol.* 141: 147-152.

Peterson C. A., and Cholewa E. 1998. Structural modifications of the apoplast and their potential impact on ion uptake. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 161: 521-531.

Pettigrew W. T. 2003. Relationship between insufficient potassium and crop maturity. *Agronomy J.* 95: 1323-1329.

Reyes O. V. 1997. Productividad de chile habanero (*Capsicum chinense*), en diferentes Mezclas de sustratos, Bajo Condiciones de Invernadero. Tesis Maestría. CIGA ITA 2. Conkal, Yucatán. México.

Rincón L., Saez J., Balsalobre E., y Pellicer C. 1995. Crecimiento y absorción de nutrientes del pimiento grueso en cultivo bajo invernadero. *Invest. Agr. Prod. Veg.* 10(1): 47-59.

Salisbury F., and Ross C. W. 1992. *Plant Physiology*. 4ª ed. Wadsworth Publishing. 673 p.

Sauerbeck D. R., and Helal H. M. 1990. Factors affecting nutrient efficiency of plants. In: El Bassam N. (ed). Genetic aspects of plant mineral nutrition, 11-17. Kluwer Academic Publisher. USA

Sheldrick W. F. 1985. World potassium reserves. In: Potassium in Agriculture. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp. 3-28.

- Silberbush M., and Barber S. A. 1984. Phosphorus and potassium uptake of field-grown soybean cultivars predicted by simulation model. *Soil Sci. Soc. Am J.* 48: 592-285
- Soria M., Tun J., Trejo A., y Terán R. 2002. Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). SEP. DGTA. ITA-2 Conkal, Yuc, México. 75 p.
- Soria F., Mazún D., Borges L., y Dzib R. 1995. Evaluación de sustratos para la producción de plántulas de chile habanero. Resumen. *En: VI Congreso de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario*. Gto. México.
- Sparks D. L., and Huang P. M. 1985. Physical Chemistry of Soil Potassium. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp 201-276.
- Sudhakar J., and Ravishankar G. A. 1996. Precursor biotransformation in immobilized placental tissues of *Capsicum frutescens* Mill. I. Influence of feeding intermediate metabolites of the capsaicinoid pathway on capsaicin and dihydrocapsaicin accumulation. *J. Plant Physiol.* 147: 481-485.
- Tinker P. B., and Nye P. H. 2000. Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press. USA. 444 p.
- Tun D. C. 2001. Características y Tecnología de Producción del chile habanero. SAGARPA. INIFAP-PRODUCE. Mérida Yuc. México. 74 p.
- Usherwood N. R. 1985. The role of potassium in crop quality. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp. 490-514.
- Van Rees K. C. J., Comerford N. B., and McFee W. W. 1990. Modeling potassium uptake by slash pine seedlings from low-potassium-supplying Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1413-1421.
- Velasco V. A. 1999. Papel de la nutrición mineral en la tolerancia a las enfermedades. *Terra.* 17(3): 193 -200.
- Véry A-A., and Sentenac H. 2003. Molecular mechanisms and regulation of K⁺ transport in higher Plants. *Annu. Rev Plant Biol.* 54: 575-603.

Wech R. M., and Epstein E. 1968. The dual mechanisms of alkali cation absorption by plant cell: their parallel operation across the plasmalemma. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 61: 447-453.

Wild A. 1989. Potasio, sodio, calcio, magnesio y azufre. *In*: Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russel. A. Wild (ed). Versión española de P. Urbano y C. Rojo. Mundi-Prensa. España. pp. 783-818.

Capítulo 1

POTASIO EN SUELOS DE YUCATÁN **Potassium content in soils of Yucatán**

Borges-Gómez Lizette¹, Escamilla-Bencomo Armando¹, Soria-Fregoso Manuel² y Casanova-Villareal Victor²

¹Centro de Investigación Científica de Yucatán. Calle 43 No. 130 Col. Chuburná de Hidalgo. CP 97200, Mérida, Yucatán, México. lizette_borges@hotmail.com.

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

El presente capítulo se presenta en la forma que ha sido publicado en la revista Terra Latinoamericana. 23:437-445. 2005.

RESUMEN

Los suelos de Yucatán 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. En Yucatán 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 solubles (K_{sol}), intercambiable (K_{int}), 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, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), y con los contenidos de Ca y Mg. Los resultados mostraron diferencias ($p < 0.0001$) entre los suelos en K_{sol} , K_{int} , D_e y b' . Una relación pobre ($r^2 = 0.6$) existe entre K_{int} y K_{sol} . Ninguna variable mostró relación con la MO y CIC; suelos con contenidos menores que 1.2 cmol kg^{-1} de K_{int} presentaron relación negativa con Ca y Mg ($r^2 = 0.74$). Los suelos con alto porcentaje de arcilla ($\geq 25\%$) estuvieron relacionados con K_{int} ($r^2 = 0.9$), 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 Claves: *Potasio soluble e intercambiable, coeficiente de difusión, poder amortiguador.*

SUMMARY

The soil of Yucatan displays 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 in Yucatan with a great variety of different soils. However, the 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 soil solution content, 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 (K_{sol}), exchangeable (K_{int}) the buffer power (b') and effective diffusion (D_e) in 16 soils with agricultural potential. The results were correlated with the percentage of clay, organic material (OM), cationic exchange capacity (CEC), and Ca and Mg concentration. The results showed differences ($p < 0.0001$) in K_{sol} , K_{int} , D_e and b' . A poor relationship ($r^2 = 0.6$) was found between K_{int} and K_{sol} . None of these showed a clear relationship with OM and CIC. Soils with contents lower than 1.2 cmol kg^{-1} of K_{int} 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 K_{int} ($r^2 = 0.9$), 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 predominantes y su concentración en la litosfera es, en promedio, de 2.6% (Sparks & 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 es que en suelos orgánicos es posible encontrar los contenidos más bajos 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 nutrimentos del suelo para las plantas depende, principalmente, de la cantidad y naturaleza en la solución del suelo y de su asociación con los nutrimentos adsorbidos o contenidos en la fase sólida del mismo (Cox *et al.*, 1999; Comerford, 1999). A medida que el cultivo remueve el K de la solución del suelo, el K intercambiable se libera y repone 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 y 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 han sido pobremente estudiadas en los suelos de Yucatán. En general, la forma analizada ha sido el K intercambiable y, para algunos sitios, se han reportado contenidos que van de 0.1 a 2.2 cmol 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 nutrimento en la solución, desde la superficie de las partículas de la cual se libera hasta las inmediaciones de la raíz. El movimiento de los nutrimentos ocurre por difusión o flujo de masas y es obvio que el contenido de agua está muy relacionado con el abastecimiento del nutrimento. Las aplicaciones de las leyes de Darcy y de Fick permiten estimar el movimiento de nutrimentos 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 nutrimentos 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 (Van Rees *et al.*, 1990a; Barber, 1984; Comerford, 1999; Tinker & Nye 2000). La evaluación del coeficiente efectivo de difusión (D_e) y del poder amortiguador (b') se han utilizado para conocer la disponibilidad de nutrimentos y en la aplicación de modelos matemáticos para predecir la absorción de nutrimentos (Van Rees *et al.*, 1990b).

Entre los principales factores que afectan la distribución de K entre la fase sólida y líquida del suelo, se encuentra 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 ión 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 base en lo anterior, el presente trabajo de investigación se realizó con los objetivos de: i) hacer una revisión de los contenidos de K soluble y su relación con el K intercambiable en 16 suelo de Yucatán, ii) relacionar los contenidos 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 los $19^{\circ} 40'$ y $21^{\circ} 37'$ latitud norte y los $87^{\circ} 30'$ y $90^{\circ} 26'$ longitud oeste. Dentro de estos límites se eligieron 16 suelos con potencial productivo con base en la zonificación edáfica y fisiográfica del estado (Duch, 1988; Duch, 1991). Cada sitio se georeferenció utilizando un GPS MAGALLANES-300 (Cuadro 1.1).

El muestreo de suelo se realizó en una superficie promedio de 500 m^2 . En cada sitio se recolectaron alrededor 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 una maya de 2 mm de diámetro. Para la caracterización de los suelos se midió: pH, por el método potenciométrico, en una relación suelo/agua 1:2; textura, por el método del densímetro de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986); porcentaje de materia orgánica (MO), por el método de Walkley y Black (Nelson & Sommers, 1986); 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 (Thomas, 1986).

Cuadro 1.1. Clasificación y ubicación de los suelos estudiados en el estado de Yucatán.

No.	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	Chac lu'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	Chac lu'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	Chac lu'um
7	El Cuyo	Ejido Sac-Bo	21°27'31" 87°38'44"	Lithic Rendolls	Rendzina	Pus lu'um
8	Maxcanu	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	Chac lu'um

Cuadro 1.1. (Continuación)

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	Temozon	km 4 carr. Temozón-Calotmul	90°49'96" 88°11'34"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac lu'um
14	Tizimin	km 10 carr. Tizimin-Buctzotz	21°8'54" 88°11'34"	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac lu'um
15	Tzucacab	km 5 del cruce con Bencanthen	20°04'06" 89°06'14"	Typic Ferrudalfts	Luvisol vértico	Ya'ax 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).

Se analizaron, en réplica de tres, las concentraciones de K intercambiable. Para ello, 20 mL de NH₄OAc 1 N a pH 7 se añadieron a 1 g de suelo, la suspensión se agitó durante 10 minutos, por acción recíproca y, posteriormente se centrifugó y filtró. En el filtrado se cuantificó el contenido de K intercambiable (K_{int}). El análisis de K soluble en agua (K_{sol}) se realizó en la solución de los suelo a capacidad de campo, por el método de centrifugación (Elkhatib *et al.*, 1987).

Las concentraciones de K_{int} y K_{sol} se obtuvieron por espectroscopia 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 & 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 ión, 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 diferentes

tiempos (1, 5, 10, 20, 40, 60, 120, 180, 240 minutos) y posteriormente se cuantificó el K removido por la membrana (C_s) y el K en equilibrio en la solución del suelo (C_i).

La distancia en que difunde el K en el suelo de un punto dado en un tiempo determinado se obtuvo de la ecuación (Tinker & 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 4.1-1999. 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, 1995) y el Sistema FAO (DETENAL, 1974) (Cuadro 1.1). 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 solo 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 los de mayor número, dos suelos del tipo Ya'axhom y solo se identificó 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 es que, en este estudio, se incluye dicha clasificación como referencia.

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 1.2), uno de ellos tuvo un pH de 5.23 y, coincidió con el menor contenido de Ca ($0.1 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). Bertsch (1995), señaló que la aplicación intensiva de fertilizantes nitrogenados, como sulfato de amonio y nitrato de amonio, generan 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 (K_{sol}) e intercambiable (K_{int}) del suelo

Los contenidos de K_{sol} y K_{int} fueron diferentes entre los sitios de estudio ($p < 0.0001$) (Cuadro 1.3). Esto se debe a que las fracciones de K_{int} dependen del material parental y su meteorización, así como del contenido y naturaleza de los coloides del suelo (Wang *et al.*, 2004). El menor contenido de K_{int} fue $0.769 \text{ cmol kg}^{-1}$ en el sitio Cacalchen, ubicado al norte de Yucatán, donde los suelos se caracterizan por ser superficiales y pedregosos. El contenido de K_{int} se incrementó hacia el sur, donde los suelos son más profundos. Por ejemplo, el suelo de Tzucacab (Luvisol vértico) presentó el mayor contenido de K_{int} ($3.015 \text{ cmol kg}^{-1}$); altos contenidos de K_{int} se ha reportado en suelos 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.

Cuadro 1.2. Características físicas y químicas seleccionadas de los suelos de Yucatán.

Suelo [†]	pH	Arcilla	MO [‡]	CIC [§]	Ca	Mg
		----- % -----			----- cmol ₍₊₎ 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.

No obstante, por su contenido intercambiable (mayor que 0.6 cmol 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 capacidad 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 nutrientes, 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”.

De manera similar a lo observado con el contenido de K_{int} , los contenidos más bajos de K_{sol} se encontraron en el norte de Yucatán, en la zona de Leptosoles y Rendzinas (Telchac Pueblo 0.023 mM, Cacalchen 0.020 mM y Buctzotzs 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_{sol} en la capa superficial del suelo (Peniche, 1994).

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

Relaciones del K con el porcentaje de arcilla, Ca y Mg

Una relación negativa entre K_{int} y Ca ($K_{int} = -63.26 (Ca) + 83.024$, $r^2 = 0.7377$) se observó en suelos con contenido menor que 1.22 cmol 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. Estudios realizados por Evangelou & 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 Ca²⁺, 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 & Delvaux (1989) señalan 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 ión K se acumula inicialmente en la mayoría de los sitios selectivos. Los suelos en donde no hubo relación entre el contenido de K_{int} 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 ión K en estos

suelos, por lo que el alto contenido de K_{int} estuvo más bien relacionado con la cantidad de arcilla que con el tipo de arcilla presente ($K_{int} = 0.0432(\%arcilla) + 0.8094$, $r^2 = 0.92$). 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. Los suelos Chaltún se caracterizan por su continua roca que aflora y los 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 1.4). 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 & Nye, 2000). Es probable que en suelos como los de la zona de Becanchen, la difusión de K sea mayor debido a una mayor proporción de arcillas 1:1. El tipo de arcilla 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 C kg^{-1}) (Shang & 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 Chaclu'um 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 $1.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ y es un valor constante, mientras que los valores de D_e del K en el suelo, en general, se encuentran entre 1×10^{-8} y $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Barber, 1984), 13 de los 16 suelos estudiados estuvieron dentro de este rango. En los suelos de Akil, Cocalchen y Telchac Pueblo la difusión de K fue menor (9.9×10^{-8} , 9.4×10^{-8} y $6.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ respectivamente). En arcillas no hidratadas como por ejemplo la illita, los valores de D_e pueden ser tan bajos como $1 \times 10^{-23} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Tinker & 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. Esto ya se ha señalado con anterioridad por Mengel & Busch, (1982) 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 el efecto de éstas sobre la capacidad del suelo para mantener una concentración de K en la solución del mismo y el desplazamiento de K a través de esta solución. El suelo que mostró la mayor 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 día⁻¹ (Figura 1.1); en un intervalo de 0.1 a 0.55 cm día⁻¹ en los suelos de Telchac Pueblo y de Becanchen respectivamente, lo que indica que el K en suelo de Becanchen se mueve aproximadamente seis veces más rápido que el K del suelo de Telchac Pueblo.

Cuadro 1.3. Contenido de K intercambiable y soluble en diferentes suelos del estado de Yucatán.

No.	K _{sol} mM	ES [†]	K _{int} cmol kg ⁻¹	ES [†]	No.	K _{sol} mM	ES [†]	K _{int} cmol kg ⁻¹	ES [†]
1	0.069 ^{fgh}	0.005	0.997 ^g	0.006	9	0.915 ^b	0.017	2.490 ^b	0.029
2	0.358 ^e	0.007	2.405 ^c	0.053	10	0.734 ^c	0.021	1.171 ^f	0.008
3	0.072 ^{fgh}	0.002	0.996 ^g	0.005	11	0.064 ^{gh}	0.005	1.199 ^f	0.014
4	0.020 ^h	0.001	0.769 ⁱ	0.016	12	0.023 ^h	0.003	0.878 ^h	0.004
5	0.673 ^{cd}	0.017	2.345 ^c	0.019	13	0.593 ^d	0.020	2.384 ^c	0.004
6	0.196 ^f	0.003	0.911 ^h	0.012	14	0.100 ^{fgh}	0.013	1.022 ^g	0.007
7	0.155 ^{fgh}	0.002	1.640 ^e	0.039	15	2.350 ^a	0.175	3.015 ^a	0.042
8	0.782 ^c	0.005	1.865 ^d	0.004	16	0.328 ^e	0.020	1.216 ^f	0.015

Cifras con la misma literal dentro de cada columna son estadísticamente iguales ($n = 3$).

[†]Error estándar.

Cuadro 1.4. Coeficiente de difusión efectiva (D_e) y poder amortiguador (b) en suelos de Yucatán.

No.	D_e $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	ES ⁺	b	ES ⁺	No.	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	9	2.3×10^{-7} ef	1.4×10^{-8}	121.6 ^a	8.25
2	1.8×10^{-8} a	6.2×10^{-8}	32.9 ^{efg}	0.76	10	7.1×10^{-7} cd	8.3×10^{-8}	14.2 ⁱ	0.50
3	9.4×10^{-7} c	7.4×10^{-8}	26.5 ^{ghi}	1.29	11	1.5×10^{-7} f	2.4×10^{-8}	34.9 ^{efg}	2.15
4	7.4×10^{-8} f	1.1×10^{-8}	58.2 ^{cd}	3.63	12	5.9×10^{-8} f	5.9×10^{-8}	62.1 ^c	0.43
5	1.5×10^{-8} b	8.1×10^{-8}	23.5 ^{ghi}	1.41	13	9.3×10^{-7} c	2.4×10^{-8}	31.6 ^{efgh}	0.65
6	9.5×10^{-7} c	7.6×10^{-8}	28.8 ^{fghi}	2.49	14	7.6×10^{-7} c	6.6×10^{-8}	42.4 ^{ef}	4.89
7	4.6×10^{-7} de	2.5×10^{-8}	32.5 ^{efg}	1.62	15	8.4×10^{-7} c	1.2×10^{-8}	28.1 ^{fghi}	0.42
8	6.6×10^{-7} d	3.0E-8	17.4 ^{hi}	0.83	16	5.9×10^{-7} d	2.4×10^{-8}	45.9 ^{de}	0.79

Cifras con las mismas literales dentro de cada columna son estadísticamente iguales. n = 3.

⁺ES = error estándar.

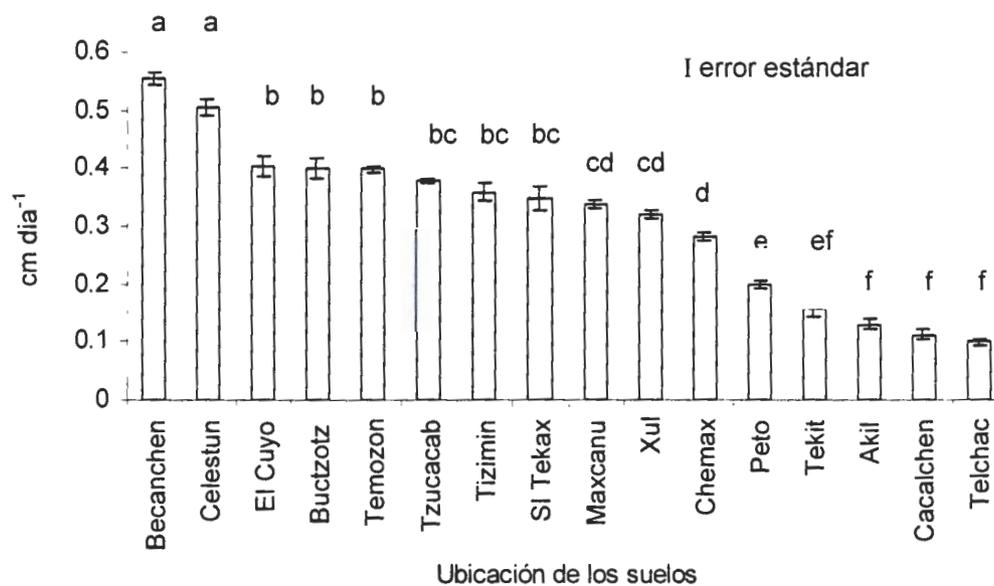


Figura 1.1. Desplazamiento de potasio en la solución de los suelos de Yucatán a capacidad de campo.

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 Tzucacab, 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^1) y el coeficiente efectivo de difusión (D_e).

El suelo de Peto es el de mayor capacidad para mantener una concentración de K en la solución del suelo, pero el que muestra un mayor coeficiente de difusión efectiva es el de Celestun.

Los valores de b^1 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^1 y D_e entre los suelos.

REFERENCIAS

Appel Ch., Ma L. Q., Rhue R. D., and Reve W. 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. A mechanistic approach. John Wiley & Sons. New York. 398 p.

Bautista-Zúñiga F., Jiménez-Osornio J., Navarro-Alberto A., Manu J., y Lozano R. 2003. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en leptosoles cárstico. *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. 157 p.

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. *En: Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos.* Orellana R., Escamilla A., y Larqué A. (eds.). Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán. México. pp. 127-135.

Cox A. E., Joern B. C., Brouder S. M., and Gao D. 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. SPP. México D.F.

Duch G. J. 1988. La conformación territorial del estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México. 427 p.

Duch G. J. 1991. Fisiografía del estado de Yucatán. Su relación con la agricultura. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México. 228 p.

Dufey J. E., and Delvaux B. 1989. Modeling potassium-calcium exchange isotherms in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1297-1299.

- Elkhatib E. A., Hern J. L., and Staley T. E. 1987. A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 578-583.
- Evangelou V. P., and Lumbanraja J. 2002. Amonium-potassium-calcium exchange on vermiculite and hydroxy-aluminum vermiculite. *Soil Sci. Soc. Am J.* 66: 445-455.
- Gee G. W., and Bauder J. W. 1986. Particle size analysis. *In: Methods of soil analysis.* A. Klute (ed.). Part 1. Physical and mineralogical methods. *Agronomy 9.* 2nd ed. Madison, Wisconsin, USA. pp. 383-409.
- Jiménez C., and Parra M. A. 1991. Potassium quantity-intensity relationships in calcareous vertisol and inceptisols of southwestern Spain. *Soil Sci. Am J.* 55: 985-989.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed Academic Press. London, U.K. 889 p.
- Mengel K., and Busch R. 1982. The importance of the potassium buffer power on the critical potassium level in soils. *Soil Sci.* 133(1): 27-32.
- Nelson D. W., and L. E. Sommers 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In: Methods of soil analysis.* A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (ed.). Part 2. Chemical and microbiological proprieties. *Agronomy 9.* 2nd ed. SSSA. Madison, Wisconsin, USA. pp. 539-547.
- Nye P. H. 1966. The measurement and mechanism of ion diffusion in soil. I. The relation between self-difussion and bulk difussion. *J. Soil Sci.* 17: 16-23.
- Olsen S. R., and Kemper W. D. 1968. Movement of nutrient to plant roots. *Adv. Agron.* 20: 91-151.
- Peniche N. 1994. Riesgos y oportuidades para el campo yucateco. Gobierno del estado de Yucatán. Mérida, México. 400 p.
- Roca-Jove M. C., and Vallejo-Calzada V. R. 2000. Predicting radiocaesium root uptake based on potassium uptake parameters. A mechanistic approach. *Plant and 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. 69 p.
- Shang C., and Tiessen H. 2003. Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. *Biochemistry* 62: 177-196.

- Soil Survey Staff. 1995. Claves para la taxonomía de suelos, versión 1994. Traducido al español por C. A. Ortiz Solorio y M. del C. Gutiérrez Castoreña. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial 3. Chapingo, México. 306 p.
- Sparks D. L., and Huang P. M. 1985. Physical Chemistry of Soil Potassium. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp 201-276.
- STATGRAPHICS. 1999. STATGRAPHICS Plus Ver. 4.1. Statistics Software for Microsoft Excel. Madison, Wisconsin. USA.
- Tinker P. B., and Nye P. H. 2000. Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press. New York, USA. 444 p.
- Thomas G. W. 1986. Cationic exchange capacity. *In: Methods of soil analysis*. A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (ed.). Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy 9. 2nd ed. Madison, Wisconsin, USA. pp. 159-164.
- Van Rees K. C. J., Comerford N. B., and Rao P. S. C. 1990a. Defining soil buffer power: Implication for ion diffusion nutrient uptake modeling. *Soil Sci. Am. J.* 54: 1505-1507.
- Van Rees K. C. J., Comerford N. B., and McFee W. W. 1990b. Modeling potassium uptake by slash pine seedlings from low-potassium-supplying soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1413-1421.
- Wang J. J., Harrel D. L., and Bell P. F. 2004. Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil. Sci. Am. J.* 68: 654-661.
- Weisbach C., Tiessen H., and Jimenez-Osornio J. 2002. Soil fertility during shifting cultivation in the tropical karst soil of Yucatan. *Agronomie* 22: 253-263.
- Wild A. 1989. Potasio, sodio, calcio, magnesio y azufre. *In: Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russel*. A. Wild (ed). Versión española de P. Urbano y C. Rojo. Mundi-Prensa. España. pp. 783-818.
- Wilson E. M. 1980. Physical geography of the Yucatan peninsula. *In: Yucatan a world apart*. Moseley E. H., and Terry E.D. (ed.). University of Alabama. Tuscaloosa, Alabama, USA. pp. 5-40.

Capítulo 2

EXCHANGEABLE POTASSIUM AND POTASSIUM DESORPTION IN 16 SOILS FROM YUCATAN

L. Borges-Gómez^{1,3}, N. B. Comerford², A. Escamilla-Bencomo¹, M. Soria-Fregoso³

Parte de este capítulo se encuentra sometido a la revista Soil Sci of American Journal.

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the K supply in 16 different soils from southeastern Mexico. The NH_4OAc method was used to evaluate exchangeable K (K_{ex}), the K release was evaluated to determine whether an increase in exchangeable K is possible by successive extractions on the same soil, and cation exchange membranes (CEMs) were used to determine the K desorption isotherms as well as the partition coefficient (K_d) which correlates the K between the solid phase (K_s) and the solution in equilibrium (K_l). The results showed significant differences of K_{ex} among the soils ($p < 0.0001$), and multiple extractions are required to obtain the total K_{ex} . The K release presented a quadratic equation with the number of sequential extractions, and the total concentration was greater than 10 mmol kg^{-1} , allowing them to be considered soils with a high content of K_{ex} . No relationships were found between K_{ex} and CEC or

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

² University of Florida. IFAS. PO Box 110290, Gainesville FL 32611-0290.

³ Instituto Tecnológico de Conkal. km 16.3 antigua carr. Mérida-Motul. Conkal, Yuc. México

OM, but there was a relationship with the percentage of clay. The K_d values showed significant differences and the comparison of means grouped the soils in 6 homogenous groups with a confidence level of 95%. No relationships were found between K_d with K_{ex} , CEC and OM, and only in the soils classified as Lithic Rendolls did the K_d show a relationship with the K exchangeable percentage (EPP) ($r^2=0.7439$). The kinetics of K adsorption by CEMs, showed no relationship with K_{ex} , indicating that large quantities of K_{ex} are not necessarily released into the soil very quickly. An analysis to identify the predominant minerals might be suggested for a subsequent study that would explain the variability of K_{ex} and the differences in K desorption to the soil solution.

Abbreviations: K_{ex} , exchangeable potassium; K_d , partition coefficient; K_s , concentration of potassium on soil phase; K_l , concentration of potassium on soil solution; CEMs, cation exchange membranes; CEC, cation-exchange capacity; EPP exchangeable potassium percentage; b' buffer power; OM, organic matter; θ volumetric water content; ρ , bulk density.

INTRODUCTION

Yucatán is located in southeastern Mexico. It is characterized by diverse soils that require a range of management techniques to produce diverse crops in the region. Potassium (K) is known to limit production of some crops, therefore a better understanding of the range of K amount and bioavailability should help better understand K cycling and fertilizer needs. In spite of its importance in crop nutrition, the content of this mineral in the soils of Yucatan has not been widely studied.

Two aspects of bioavailable soil K is the amount of K in an exchangeable form and shape of the K desorption isotherm. Exchangeable potassium (K_{ex}) is the laboratory index commonly used to express the amount of bioavailable K in soil, while sequential extractions using solutions or exchange membranes have been employed to develop desorption isotherms. It is possible to have relatively high exchangeable K but relatively low desorption due to differences in the amount and type of clay. For this

reason inconsistencies in interpreting K_{ex} values have been evident. Occasionally, low K_{ex} has been associated with a moderately bioavailable K.

The existing equilibrium between K in the soil solution and that adsorbed to the colloids is reversible and the process of release and retention occurs simultaneously. The desorption isotherm has been used to describe the ability of the soil to release K to the solution and this can be represented by the slope of the desorption isotherm, known as the partition coefficient (K_d). The importance of K_d resides in its relationship with the soil buffer power and its application in the diffusion coefficient. Van Rees *et al.*, (1990) defined buffer power as:

$$b' = \theta + \rho K_d \quad (1)$$

where b' is the buffer power and indicates the ability of a soil to maintain the intensity of K in the soil solution, θ is the volumetric water content (L^3L^{-3}) and ρ is the apparent soil density ($M M^{-3}$).

In spite of the importance of K_d , its value for desorption is poorly documented. Desorption isotherm has been evaluated by adding solutions with different K concentrations to the soil and after a period of equilibrium, the K is extracted and quantified (Barber, 1984; Wang *et al.*, 2004; Schneider, 1997; Roca-Jove, 2000). Another method of evaluating desorption K is via extractions applied at a range of soil weight to solution volume ratios (Smethurst & Comerford, 1993). K_d in both cases is determined as a function of the K concentration in the liquid phase. Cationic exchange membranes have been used to determine extractable K (Barber, 1984; Schoenau *et al.*, 1993; Quian *et al.*, 1996; Quian & Schoenau, 1997); however, these could also be used to determine the K concentration in the solid phase (K_s) and the K in equilibrium in the liquid phase (K_l), and subsequently, the values of K_d . This technique best simulates the dynamics of release in the soil and absorption through the roots without much alteration of the soil matrix.

Due to the importance of K in crop nutrition and the scanty information on soil K content for the diversity of soils in Yucatan, this research has the following objectives: i) determine the K_{ex} content of diverse soils in the state of Yucatán and establish if multiple extractions are required to measure it, and ii) evaluate the K desorption isotherms using cation exchange resin membranes.

MATERIALS AND METHODS

Soils and Soil Sampling

Yucatán is located between 19°40' and 21°37' LN and 87°30' and 90°26' LW. Within these boundaries, 16 sites were selected. These sites were distributed in the 9 regions comprising the state, in accordance with the division established by the government (INFDM, 2002) (Figure 2.1). Soil sampling was carried out over an average surface area of 500m². Eighty individual samples were collected in zig-zag pattern in each site (Sabbe & Marx, 1987), they were mixed, and three samples were taken. The samples were taken from the arable layer of soil which varied according to the site: in deeper soils, the sample depth was 0 to 30 cm, while in shallower soils, the depth was limited by the presence of rock, but in no case it was deeper than 30 cm. The samples were dried in the shade and sieved through a 2 mm mesh. For soil characterization, pH was evaluated by the potentiometric method with a soil/water ratio of 1:2; texture was evaluated by the Bouyoucus densimeter method (Gee & Bander, 1986); percent organic material (OM) by the Walkley and Black method (Nelson & Sommers, 1986); and the cation exchange capacity (CEC) by the NH₄OAc method (Thomas, 1986).

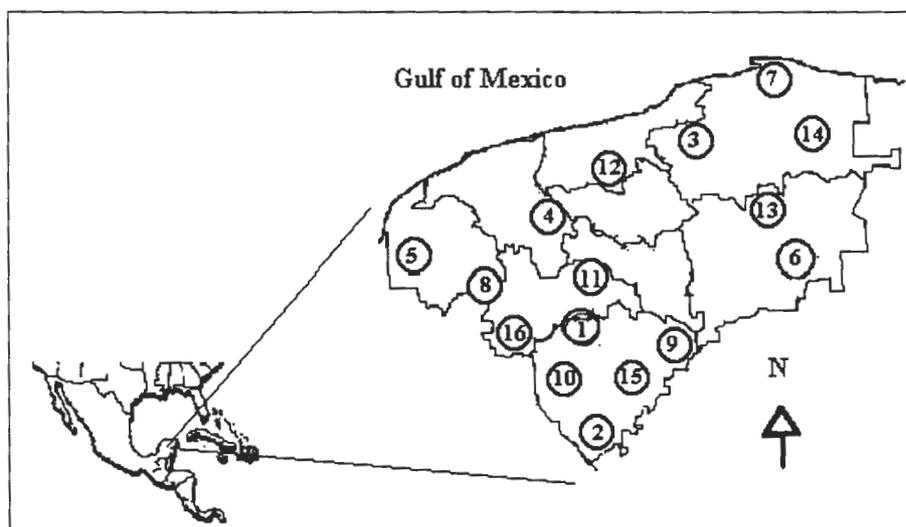


Figure 2.1. Location of the soils in Yucatan, Mexico. 1, Akil; 2, Becanchen; 3, Buctzotz; 4, Cacalchen; 5, Celestun; 6, Chemax; 7, El Cuyo; 8, Maxcanu; 9, Peto; 10, San Isidro; 11, Tekit; 12, Telchac Pueblo; 13, Temozon; 14, Tizimin; 15, Tzucacab; 16, Xul.

Release of exchangeable potassium

Sequential extractions with 1M NH_4OAc at pH 7 were performed on the same sample to remove the K_{ex} that remains adsorbed to the colloids after the first extraction. One g of soil was weighed in triplicate into 50 mL centrifuge tubes. Twenty mL of 1M NH_4OAc at pH 7 were added as the extracting agent and the sample was shaken with a reciprocating shaker for 10 minutes. Subsequently, the suspension was centrifuged for 15 min at 3000 rpm and filtered through Whatman No. 42 filter papers. The K content was quantified by atomic absorption spectroscopy using Perkin-Elmer model N930014 equipment. The soil was left in the centrifuge tubes while twenty mL of 1M NH_4OAc at pH 7 were again added and the procedure was repeated as described above. In all, four sequential extractions of each sample were made.

Cation exchange membranes in the evaluation of the potassium partition coefficient (K_d)

In order to evaluate K_d it is necessary to determine the K content in the solid phase of the soil (K_s) and the K concentration at equilibrium in the liquid phase (K_l). Therefore, 1 g of soil was weighed in triplicate into 50 mL centrifugal tubes. Twenty mL of double deionized, distilled water and a cation exchange membrane (Type CR 61 CZR-442; IONICS, INCORPORATED. Watertown, Massachusetts 02172 USA) of 3 cm x 7.5 cm previously saturated with NH_4OAc 1M pH 7 were introduced into each tube. Each suspension was shaken for 1, 3, 6, 10, 20, 40, and 60 minutes, the membrane was then extracted and the K removed by the membrane (K_m) was quantified using NH_4OAc 1M pH of 7 to extract the K adsorbed to the membrane. The suspensions of soil and water were shaken for another hour, after which each suspension was centrifuged for 15 min at 3000 rpm, the supernatant was filtered through Whatman No. 42 filter papers, and the amount of the K in equilibrium (K_l) in the filtrate was then quantified. The samples already shaking for 60 minutes were shaken again for an additional 60 minutes after adding more water and another membrane and the procedure repeated. This was done three more times until the shaken times ranged from 1 to 240 minutes.

Analysis of variance and comparison of means by Tukey were used to test differences in the amount of K released with NH_4OAc in the 16 soils. For sequential extracts, analyses were run on the first extract and also on the cumulative total for all four extracts. Analysis of variance was also used to test differences in the amount of K in the solid phase (K_s) and K in equilibrium in the liquid phase (K_l) for each shaking period (1, 3, 6, 10, 20, 40, 60, 120, 180, and 240 min). The analysis was also run for the

values of K_d . The analysis of correlation was carried out to compare the pH averages, clay percentage, CEC, and OM.

RESULTS AND DISCUSSION

Soils of Yucatán

Although the soils in Yucatán originate from calcareous rock (Wilson, 1980), they tend to be more developed the further they are from the coast. This is explained by the geological history of Yucatan. To the south, petrous material with an approximate age of 36 to 58 million years is found (Duch, 1988), while in the north, the soils are shallow and poorly developed, with the presence of recently emerged Pleistocene rock. The classification of the 16 sampled soils is shown in Table 2.1. The sampled sites were flat surfaces with sandy soils predominating, shallow with rock outcrops, and different proportions of loose stones, and only one horizon (O, A or Ap) classified as Lithic (Soil Survey Staff, 1995). In only a few sites, clay soil was found with a depth of over 40 cm and with two horizons (Ap and Bt); the vegetation on each site was diverse. Tables 2.2 and 2.3 show the characteristics of each sampling site and the selected properties of the soil. The average clay content was 23% with a range of 9 to 49 %. The range of CEC was from 16 to 59 cmol kg^{-1} and the percent OM was from 2 to 16 (Figure 2.2).

Measurement of exchangeable K and revised values

The range of K_{ex} with the initial extraction was 8 to 36 mmol kg^{-1} , while the amount after the final extraction was between 11 and 45 mmol kg^{-1} (Table 2.4). The K_{ex} in each extraction was significantly different among the soils ($p < 0.0001$). It was found that, in one extraction, an average of 79% of the total K_{ex} was obtained, 15% in the second, 4% in the third, and 2% in the fourth. The rate of release of K depends on how much mica is present, the type of clay minerals present, the amount of edge exposure, and the distance the K must travel to reach the outer edge of the particle (Mc Clean & Watson, 1985; Sparks & Huang, 1985).



Akil



Becanchen



Buctzotz



Cacalchen



Celestun



Chemax



El Cuyo



Maxcanu



Peto



San Isidro



Tekit



Telchac Pueblo



Temozon



Tizimin



Tzacacab



Xul

Figure 2.2. Soils selected from Yucatán

The presence of a great variety of clays of the types 1:1 and 2:1 is possible in the soils evaluated, where initially, the K released is found on the edges of the mineral lamina and subsequently, when the NH₄OAc disperses towards the interior of the laminar structure, a new surface comes into contact with the NH₄⁺, thus increasing the K released (Comerford *et al.*, 1990). This would explain why, in the first extraction, it is not possible to obtain 100% of exchangeable K. The K release from the soil with highest content of clay was greater, whereas K was depleted from the soils with low content of clay.

The Celestun soil had high K content and low clay percentage, but this soil had the highest content of OM, which favors a high CEC (Oorts *et al.*, 2003) and, as a result, the higher retention of K. The increase in K_{ex} in the fourth extraction in comparison with the first was, on average, 5 mmol kg⁻¹ with a range of 2 to 8 mmol kg⁻¹. K_{ex} of the first extraction was significantly correlated (r²=0.9897, p<0.01) with the cumulative K_{ex} after 4 extractions. The K release in the subsequent extractions was described by the function:

$$y = m(x)^n \quad (2)$$

where y is the quantity of K extracted, x is the number of extractions and, n and m are regression constants (Table 2.4). Aguado-Lara *et al.*, (2002) reported that, soil type and initial K quantity notwithstanding, the release in sequential extractions can be described by the same function. Logarithmic transformation of the same function has been used by Havlin *et al.*, (1985). These data show that one extraction is not sufficient and that at least three successive extractions are required to achieve a relatively constant value for K_{ex}.

According to Barber (1984), a soil with 4 mmol kg⁻¹ of K_{ex} is considered sufficiently high to allow the development of crops. If this were true then all soils of Yucatán should satisfy the K requirements of crops. However, in the production of crops such as Habanero pepper (*Capsicum chinense*), tomato (*Lycopersicon esculentum*), cucumber (*Cucumis sativus*), and papaya (*Carica papaya*), to mention but a few, the application of large amounts of K is required, (SDR, 1997; Soria *et al.*, 2000; Soria *et al.*, 2002). The problem must therefore reside in the dynamics of the availability rather than the solid phase amount of K. K bioavailability is closely related to the mobility and diffusion of the nutrient in the soil (Nye, 1977; Baber, 1984; Bertsch & Thomas, 1985; Tinker &

Nye, 2000), which involves several factors including the size and type of clay predominating, which will influence the value of K_d .

Due to the high content of calcium carbonates (Duch, 1988) and organic material (between 50 and 150 g C kg⁻¹) (Shang & Tiessen, 2003) the identification of predominant minerals in the soils of Yucatan has been difficult and poorly documented. However, it has been reported that, in the majority of the northern soils, kaolinite predominates. In general, the sites where this mineral is found are flat, with moderate rainfall, and good drainage. In areas where there is heavy rainfall or where drainage is poor, montmorillonite predominates (Wilson, 1980). Kaolinite shows greater preference for K than does montmorillonite, although the latter retains it more effectively (Fassbender, 1975). Minerals of Palygoskite-Sepiolite with a high adsorption capacity have also been reported in small amounts in soils of northern Yucatan. Soils classified as Chaclu'um (according to the Mayan classification) or Rendzina (FAO) reported the presence of halloysite, boehmite, quartz, hematite, calcite, and illite (Bautista-Zuñiga *et al.*, 2003), and the amount of K_{ex} was between 8 and 12 mmol kg⁻¹. Similar contents were found in four of the six soils classified as Chaclu'um in the first extraction, increasing from 10 to 15 mmol kg⁻¹ in the fourth extraction.

Correlation of exchangeable potassium with selected soils properties

Excluding the soil from Celestun, K_{ex} was positively and significantly related to the percent clay ($r^2 = 0.87, 0.88, 0.90,$ and 0.90 $p < 0.01$ for the sequential extractions 1, 2, 3, and 4, respectively). The soil from Celestun was omitted because it consists mainly of rock, which explains the Mayan classification "Chaltún" meaning "outcrops of rock or slabs" (SARH, 1982), and its depth of scarcely 2 cm with a high OM content (16 %) which has a marked effect on the exchange complex (Otero *et al.*, 1998; Tinker & Nye, 2000; Oorts *et al.*, 2003).

No relationship was found between K_{ex} and CEC or OM percentage; however, CEC was significantly related to OM ($r^2 = 0.9061$, $p < 0.01$), and much less so to clay ($r^2 = 0.43$). This demonstrates the influence of the high OM contents that characterize these soils (between 5 and 16%) on the exchange complex; Oorts *et al.*, (2003) reported a contribution of between 75 and 85% of organic material on CEC in Ferric Lixisol soils with a high proportion (60%) of kaolinite and some mica, goethite, and hematite.

Table 2.1. Classification and location of sixteen soils from Yucatan, Mexico.

Site	Location	USA Classification	FAO Classification	Mayan Classification [†]
Akil	20°14'49.74"LN 89°19'48"LW	Lithic Eutrochrepts	Chromic Cambisols	Kancab
Becanchen	19°52'54"LN 89°13'22"LW	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac-lu'um
Buctzotz	21° 11'30" LN 88° 46' 43"LW	Lithic Eutrochrepts	Calcaric Cambisols	Kancab
Cacalchen	20°59'10.43"LN 89°14'35.38"LW	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac-lu'um
Celestun	20° 51' 33"LN 90° 12' 55"LW	Lithic Ustorthens	Leptosol	Chaltún
Chemax	20°42'22"LN 87°52'28"LW	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac-lu'um
El Cuyo	21°27'31"LN 87°38'44"LW	Lithic Rendolls	Rendzina	Pus-lu'um
Maxcanu	20°34'42"LN 90°02'23"LW	Typic FerrudalFs	Vertic Luvisols	Kancab
Peto	20°08'3"LN 88°58'02"LW	Typic FerrudalFs	Vertic Luvisols	Kancab
San Isidro	19°49'44"LN 89°25'05"LW	Typic Haplauderts	Pellic Vertisols	Ya 'ax-hom
Tekit	20°31'48"LN 89°20'24"LW	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac-lu'um
Telchac Pueblo	21°13'8.1"LN 89°16'13.3"LW	Lithic Usthorthents	Leptosol	Tze'kel
Temozon	90°49'96"LN 88°11'34"LW	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac-lu'um
Tizimin	21°8'54"LN 88°11'34"LW	Lithic Rendolls	Rendzina	Chac-lu'um
Tzucacab	20°04'06"LN 89°06'14"LW	Typic FerrudalFs	Vertic Luvisols	Ya 'ax-hom
Xul	20°4'14.4"LN 89°28'41.4"LW	Vertic Eutrochrepts	Calcaric Cambisols	Kancab

[†] The Mayan soil classification is used extensively among farmers, and is based mainly on the characteristics such as color, stony, type of vegetation it sustains, depth drainage, relief, and slope.

Table 2.2. Characteristics of the sampling sites.

Site	Horizon	Pr [†]	Color [‡]	p [§]	Vegetation
Akil	Ap 0-25	25	2.5 YR 3/2 dry	3-5	Avocado (<i>Persa americana</i>), orange (<i>Citrus sinensis</i>), and sapota (<i>Casimiroa edulis</i>)
Becanchen	Ap 0-40	40	10 YR 2/2 wet	5-10	Sapota (<i>Casimiroa edulis</i>), and mango (<i>Mangifera Indica</i>)
Buctzotz	Ap 0-14 Bt 14-69	< 40	10 R 3/4 dry 2.5 YR 3/6 dry	35-50	Huamil (<i>Enretica latifolia</i>)
Cacalchen	Ap 0-15	15	5 YR 3/3 dry	50-70	Sisal (<i>Agave sisalana</i>)
Celestun	O 0-2	2	10 YR 3/1 dry	< 90	Epiniird shrubby
Chemax	A 0-5	5	10 YR 2/2 wet	70-90	Maize (<i>Zea mays</i>), pea (<i>Pisum sativum</i>), and squash (<i>Cucurbita moschata</i>)
El Cuyo	Ap 0-13 A1 13-36	36	7.5 YR 2/0 wet 2.5 Y 2/0 wet	5-10	Grassland
Maxcanu	Ap 0-14 Bt <14	< 40	2.5 YR 3/3 wet 2.5 YR 4/6 wet	3-5	Huamil (<i>Enretica latifolia</i>)
Peto	Ap 0-15 Bt <15	< 40	2.5 YR 3/4 wet 2.5 YR 3/6 wet	3-5	Tajonal (<i>Viguiera dentata</i>), maize (<i>Zea mays</i>), and banana (<i>Musa sapientum</i>)
San Isidro	Ap 0-22	< 40	7.5 YR 3/4 wet	5-10	Grassland
Tekit	Ap 0-20	20	5 YR 4/6 dry	35-50	Banana (<i>Musa sapientum</i>), and papaya (<i>Carica papaya</i>)

Table 2.2. (Continued)

Telchac Pueblo	Ap 0-20	20	5 YR 4/4 dry	70-90	Tsitsilché (<i>Gymnopodium floribundum</i>) and sisal (<i>Agave sisalana</i>)
Temozon	Ap 0-8	8	7.5 YR 3/3 wet	15-35	Grassland
Tizimin	Ap 0-29	29	5 YR 3/2 wet	35-50	Without vegetation
Tzucacab	Ap 0-22 Bt < 22	< 40	5 Y 2.5/2 wet 2.5 YR 3/6 wet	Non existent	Remnants of watermelon (<i>Citrillus vulgaris</i>)
Xul	Ap 0-15 Bt 15-25	< 40	2.5 YR dry 2.5 YR 4/6 dry	3-5	Remnants of maize (<i>Zea mays</i>)

[†] Depth.

[‡] Color at time of sampling.

[§] Stones in the surface, in percent.

Table 2.3. Physical and chemical properties of selected soils.

Site	Sand	Silt	Clay	pH	CEC [†]	OM [‡]	ρ^{\S}	θ^{\dagger}
	-----%-----				cmol kg ⁻¹	%	M M ⁻³	L ³ L ⁻³
Akil	54	28	18	7.3	37	5	0.86	0.33
Becanchen	50	13	37	7.4	40	6	0.88	0.69
Buctzotz	71	15	14	7.2	53	11	0.71	0.53
Cacalchen	68	21	11	7.0	56	13	0.81	0.30
Celestun	58	33	9	7.2	59	16	0.86	0.58
Chemax	58	28	14	7.2	44	8	0.76	0.43
El Cuyo	70	13	17	7.5	45	10	0.73	0.54
Maxcanu	41	34	25	6.2	32	4	0.84	0.40
Peto	36	22	43	6.6	30	4	0.82	0.54
San Isidro	47	29	24	5.2	16	3	0.87	0.37
Tekit	63	22	15	7.2	41	6	0.74	0.29
Telchac Pueblo	70	17	13	7.3	44	10	0.76	0.26
Temozon	48	18	34	7.1	39	7	0.81	0.54
Tizimiín	60	21	19	6.7	31	7	0.83	0.56
Tzucacab	26	25	49	6.3	29	2	0.87	0.49
Xul	46	27	27	7.0	26	4	0.90	0.54

[†]Cation-exchange capacity

[‡]Organic matter

[§]Bulk density

[⋆]Volumetric water content of soil at field capacity

Table 2.4 Regression equation coefficients of cumulative potassium release (mmol kg⁻¹) from four sequential extractions with NH₄OAc[†].

Site	1 st release	2 nd release	3 rd release	4 th release	Total increment in K	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>r</i> ²
Akil	12 (69)	16 (19)	18 (11)	18 (0)	6	13	0.28	0.95
Becanchen	30 (79)	36 (15)	38 (6)	38 (0)	8	31	0.18	0.93
Buctzotz	11 (83)	13 (15)	14 (1)	14 (0)	2	12	0.13	0.83
Cacalchen	8 (78)	10 (17)	10 (1)	11 (4)	2	9	0.18	0.90
Celestun	29 (78)	34 (15)	35 (4)	37 (3)	8	29	0.18	0.96
Chemax	10 (75)	12 (16)	13 (5)	14 (5)	3	10	0.21	0.97
El Cuyo	20 (81)	23 (12)	24 (4)	25 (3)	5	21	0.16	0.97
Maxcanu	22 (86)	25 (11)	25 (1)	25 (1)	3	22	0.11	0.89
Peto	29 (79)	34 (15)	36 (6)	36 (0)	8	29	0.18	0.93
San Isidro	20(81)	22(11)	24(5)	24(3)	5	20	0.15	0.99
Tekit	12(81)	14(14)	15(4)	15(1)	3	12	0.16	0.93
Telchac P.	13(80)	16(19)	16(0)	16(0)	3	13	0.16	0.80
Temozon	30(83)	34(12)	35(2)	36(3)	6	30	0.13	0.93
Tizimin	12(78)	14(13)	15(4)	15(5)	3	12	0.18	0.98
Tzucacab	36(81)	42(13)	44(5)	45(0)	8	37	0.16	0.94
Xul	14(71)	17(17)	20(11)	20(1)	6	14	0.26	0.97

[†]The equation is $y = m(x)^n$, where x is the number of extractions, y is concentration of K, and m and n are empirical regression constants. The number in parenthesis is the percent increment of K.

Desorption Isotherms and Partition Coefficient (K_d)

The K desorption isotherm appeared to be linear over the range investigated and was described by the equation:

$$K_s = a(K_l) + b \quad (3)$$

where K_s is the K concentration on the solid phase expressed in mmol kg^{-1} , K_l is the equilibrium K concentration in the liquid phase expressed in mmol L^{-1} , a is the partition coefficient (K_d) and b is a regression constant (Table 2.5); the K_d values were between 20 and 148. Figure 2.3 gives desorption data for three contrasting soils; a Lithic Usthorthent with high cation exchange capacity and organic material content, and two Lithic Rendolls with similar cation exchange capacity and a lower OM content. The K_d values for the soils with similar CEC were 37 and 39 (Becanchen and Temozon, respectively) while for the Lithic Usthorthent, the K_d was 83 (Telchac Pueblo). The reaction rate between soil solution and exchangeable phase of K is strongly dependent on the type of clay minerals present and on the methods employed to measure the kinetics of K exchange. Very little research has been carried out on the kinetics between solution and exchangeable forms of K in mixed soil systems (Sparks & Jardine, 1984). Vermicute, montmorillonite, kaolinite, and hydrous micas vary drastically in their ionic preferences, ion binding affinities, and types of ion exchange reactions. Such fundamental differences in the clay minerals account for the varying kinetics of exchange and K_d . No relationship was found between K_d and the values of K_{ex} from the 4 sequential extractions. Therefore, it is possible to have high K_{ex} and low desorption, and vice versa.

Correlation of K_d with selected soils properties

Seven of the 16 soils classified as Lithic Rendolls registered a good linear relationship between K_d and the exchangeable potassium percentage:

$$K_d = -3.064(\text{EPP}) + 62 \quad r^2 = 0.74 \quad p < 0.05 \quad (4)$$

Where EPP is the percent K saturation of the exchange complex. This equation could be used to predict K_d in Lithic Rendolls soils from the EPP data easily obtained from the CEC and K_{ex} values. These same variables (EPP and K_{ex}) have been used by Jimenez & Parra (1991) to predict the activity of the K ion in equilibrium, with $r^2 = 0.762$. The other moderately strong relationships between K_d and soil parameters for Lithic Rendolls was with organic material ($K_d = 3.4(OM) + 19.5$, $r^2 = 0.52$, $p < 0.1$). A positive correlation ($r^2 = 0.72$) between CEC and the buffer power has been reported by Schneider (2003), However, in this soil there is not statistically significant relationship between these variables.

There was no significant relationship evident between K_d and percent clay, although it has been reported by others. Mengel & Busch (1982) reported that in soils with a high clay content (50%) with a predominance of kaolinite and chlorite had low buffer power; while soils with low clay (17%), where illite and vermiculite predominate, had high buffer power.

Table 2.5. Desorption isotherms of potassium by cationic exchange membranes.

Site	a^{\dagger}	SE^{\ddagger}	b^{\S}	r^2	Site	a^{\dagger}	SE^{\ddagger}	b^{\S}	r^2
Akil	91 ^b	1.4	-3.5	0.91	Peto	148 ^a	10	-4.7	0.95
Becanchen	37 ^{cde}	0.9	14.8	0.97	San Isidro	16 ^f	0.6	8.2	0.88
Buctzotz	38 ^{cde}	1.8	3.5	0.97	Tekit	48 ^{cd}	2.3	2.2	0.92
Cacalchen	72 ^b	4.5	-0.4	0.98	Telchac P.	83 ^b	0.6	1.9	0.97
Celestun	34 ^{cdef}	2.1	12.9	0.90	Temozon	39 ^{cde}	0.8	1.0	0.97
Chemax	43 ^{cd}	2.1	2.1	0.94	Tizimin	51 ^c	5.9	2.1	0.96
El Cuyo	39 ^{cd}	3.4	1.7	0.98	Tzucacab	32 ^{def}	0.5	13.7	0.91
Maxcanu	20 ^{ef}	1	7.5	0.97	Xul	51 ^c	0.9	2.4	0.98

Same letter means not significantly different by Tukey test, whit 95% confidence level

[†]Partition coefficient (K_d) obtained from the slopes of linear desorption isotherms

[‡]Standard error

[§]Regression constants

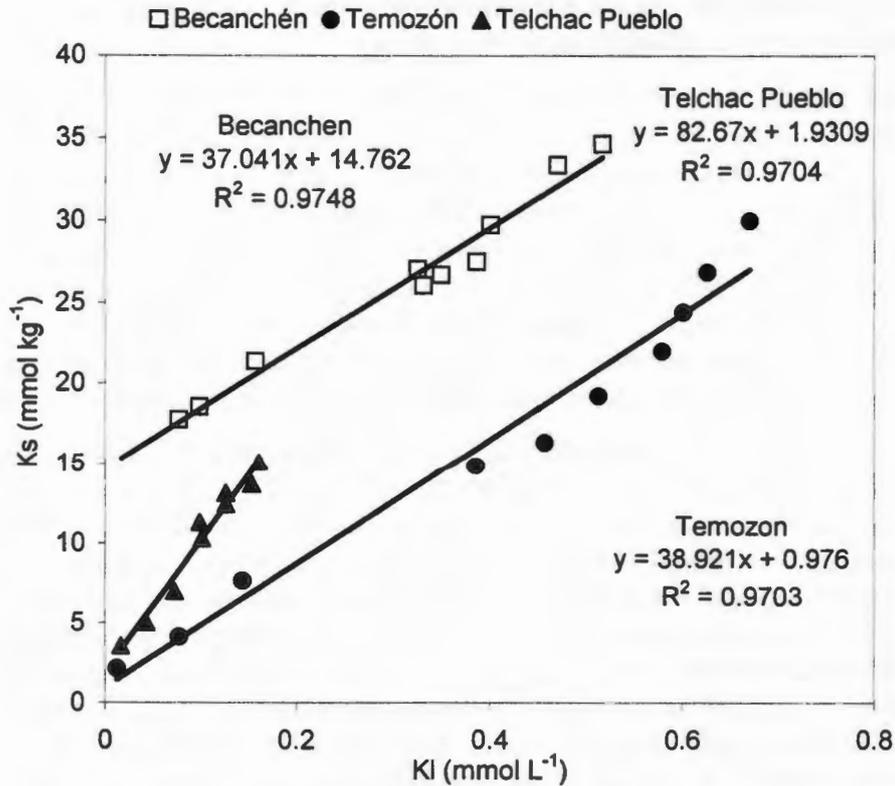


Figure 2.3. Relationship between potassium on soil phase (K_s) and potassium on soil solution (K_i) for three soils representing the range found for 16 soils: Lithic Rendolls (Becanchén and Temozón) and Lithic Usthorthents (Telchac Pueblo). Curves calculated with the equation $K_s = a(K_i) + b$ where a is K_d , and b is empirical regression constant.

Kinetics of adsorption by cation exchange membranes

The amount of K adsorbed by CEMs was described by function (2): $y = m(x)^n$, where y is the quantity of K adsorbed by CEMs, x is the time of agitation, and n and m are regression constants. The n slope relating the kinetics of adsorption through the membrane with the time of agitation showed no relationship with the K_{ex} . This demonstrates that K availability for the plants does not depend on high amounts of K in

the soil but on its release into the soil solution. The speed of this process would, in turn, depend on the predominant type of clay in the soil.

K desorption from the soil and K adsorption by CEMs increased with agitation periods of 10 minutes for 3 soils, 20 minutes for 4 soils, 40 minutes for 8 soils, and 60 minutes for one soil. After the periods indicated, K adsorption by CEM is lower (Figure 2.4). The best relation ($r^2 = 0.77$, $p < 0.01$) between the percentage of clay in the 15 soils (without Celestun) and the K adsorbed by the membrane is obtained at 10 minutes of agitation. If we consider that the adsorption of K by the membranes represents the K possibly absorbed by the roots, then the availability of K depends for a short time on the percentage of clay. After this time, factors such as the type of clay and the organic matter content may be involved in the desorption of K from the solid phase of the soil.

When the soil sample that had been shaken for 60 minutes was subjected to three additional successive agitation periods of 60 minutes each (120, 180, and 240 min), more K was adsorbed by CEM, indicating that K release to the soil is a slow process. This increase with the agitation time is due to the fact that, as the K is liberated, new charge sites are exposed. The kinetics of K exchange on kaolinite and mormolillonite are usually quite rapid, and the kinetics of K exchange on vermiculitic and micaceous minerals tend to be extremely slow. Slow kinetics is due to interlattice exchange sites; rapid kinetics to external planar sites; and intermediate kinetics to interlayer lattice edge sites (Bolt *et al.*, 1963; Sparks & Jardin, 1984). This is quite independent from the amount of K_{ex} present in the soil. Thus, Becanchen soil, for example, with a high amount of K_{ex} (38 mmol kg^{-1}), the main adsorption of K by CEM occurs after the first ten minutes (Figure 2.4a), while for Buctzotz soil, with a lower amount of K_{ex} (14 mmol kg^{-1}), the main adsorption of K by CEM occurs after 40 minutes (Figure 2.4d). The K adsorbed by CEM in both soils represents 30% of the total K_{ex} .

The benefits of the analysis with CEMs reside in two facts: that no chemical extracting agents are used, and that it quantifies the available K and the rate at which K is liberated from the soil, which is obtained by simulating root absorption. This has already been tested by Schoenau *et al.*, (1993), and by Quian *et al.*, (1996) when they obtained a positive relationship with the use of membranes placed directly in the soil for the study of K absorption in canola plants. However, these values were always lower than those obtained with NH_4OAc . It is possible that the high values of K_{ex} obtained with NH_4OAc in comparison with those obtained with CEMs are due to the greater abrasion of the extracting agent (NH_4OAc), increasing the labile K in such cases (Le Roux & Summer, 1968).

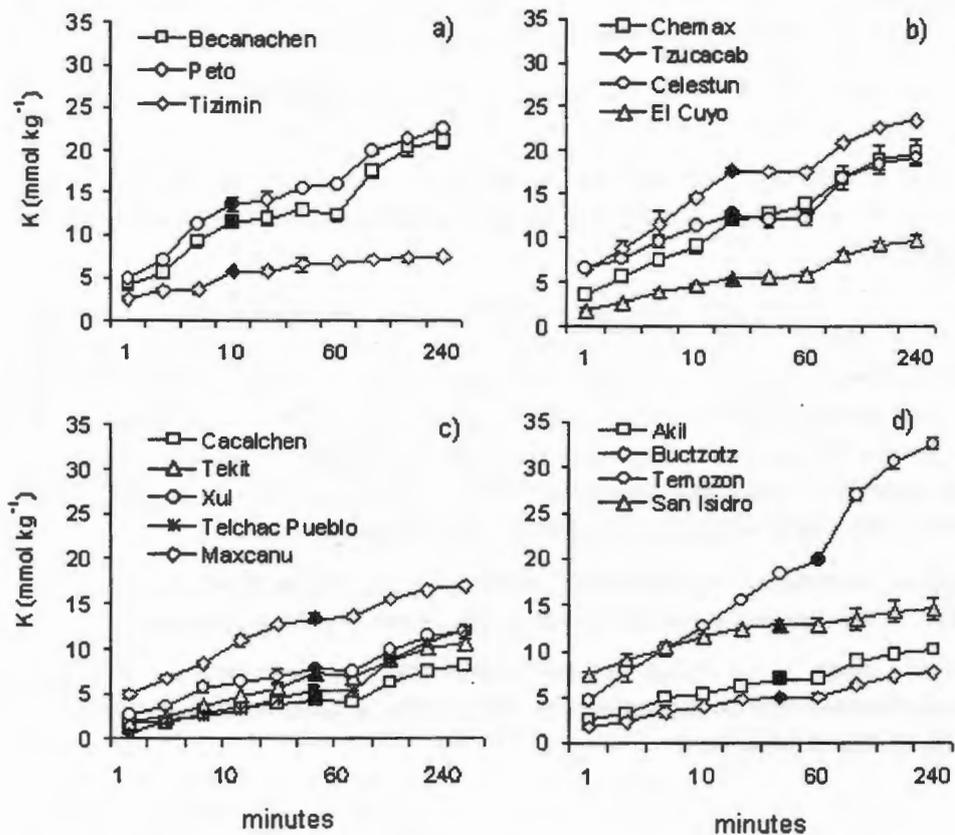


Figure 2.4. K^+ desorbed by the soil and adsorbed by CEMs, simulating the K^+ possibly absorbed by the roots. Black symbols show the moment in which the adsorption by CEMs begins to reduce, and the dotted lines represent the K^+ adsorbed when a new membrane is introduced in the same soil sample agitated for 60 minutes.

CONCLUSIONS

These data show that the soils of Yucatan require multiple extractions in order to obtain the best estimate of K_{ex} , and that they contain a high K_{ex} .

Given the high amount of K_{ex} in the soils under study, they can be considered rich in K, however, it is slowly available for the plants.

The presence of different types of clay is evident, and this contributes to the fact that desorption of K is different among the soils and independent of the amounts of exchangeable K.

Cation exchange membrane can be considered an alternative method in the development of desorption isotherms since it is performed in a short time and does not use chemical extracting agents that might alter the spontaneous K liberation to the soil solution as this is removed by the plants, a simulation which, in this case, is performed by the exchange membrane. In the majority of the studies carried out before, several days were required to obtain the desorption isotherm whereas with the use of CEM for a period of 60 minutes was enough to obtain the desorption isotherm.

In seven of the sixteen soils studied, the K_d obtained from the desorption isotherm was related to the K exchangeable percentage or to the cation exchange capacity.

A subsequent study could focus on the identification of the minerals and their proportion in the soils that could explain the differences obtained in the amount of K_{ex} and the differences in desorption.

REFERENCES

- Aguado-Lara G., Etchevers-Barra J., y Hidalgo-Moreno C. 2002. Dinámica del potasio en Suelos Agrícolas. *Agrociencia* 36: 11-21.
- Barber S. A. 1984. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley & Sons. New York. 398 p.
- Bautista-Zúñiga F., Jiménez-Osornio J., Navarro-Alberto A., Manu J., y Lozano R. 2003. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en leptosoles cárstico. *Terra*. 21: 1-11.
- Bertsch P. M., and Thomas G. W. 1985. Potassium status of temperate region soils. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp. 131-162.
- Bolt G. H., Summer M. E., and Kamphorst A. 1963. A study of the equilibrium between three categories of potassium in an illitic soil. *Soil. Sci. Am Proc.* 27: 294-299.
- Comerford N. B., Harris W. G., and Lucas D. 1990. Release of nonexchangeable potassium from a highly weathered, forested quartzipsamment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1421-1426.
- Duch G. J. 1988. La conformación territorial del estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México. 427 p.
- Fassbender H. W. 1975. Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José de Costa Rica. 398 p.
- Gee G. W., and Bauder J. W. 1986. Particle size analysis. *In: Methods of soil analysis*. A. Klute (ed). Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy 9. 2nd ed. Madison, Wisconsin, USA. pp. 383-409.
- 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.* 49: 371-376.
- INFDM. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. 2002. Enciclopedia de los municipios de México. Los municipios de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán. [En línea] Disponible:
http://inafed.gob.mx/wb2/INAFED/INAF_Enciclopedia_de_los_Municipios_de_Mexico.

- Jiménez C., and Parra M. A. 1991. Potassium quantity-intensity relationships in calcareous vertisol and inceptisols of southwestern Spain. *Soil Sci. Am J.* 55: 985-989.
- Le Roux J., and Sumner M. E. 1968. Labile potassium in soils I: Factors affecting the quantity-intensity (Q/I) parameters. *Soil Sci.* 106(1): 35-41.
- Mc Clean E. O., and Watson M. E. 1985. Soil measurements of plant-available potassium. *In: Potassium in Agriculture.* American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison. USA. pp. 277-308.
- Mengel K., and Busch R. 1982. The importance of the potassium buffer power on the critical potassium level in soils. *Soil Sci.* 133(1): 27-32.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In: Methods of soil analysis.* A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (ed.). Part 2. Chemical and microbiological proprieties. Agronomy 9. 2nd ed. SSSA. Madison, Wisconsin, USA. pp. 539-547.
- Nye P. H. 1977. The rate-limiting step in plant nutrient absorption from soil. *Soil Sci.* 123: 292-297.
- Oorts K., Vanlauwe B., and Merckx R. 2003. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 100: 161-171.
- Otero L., Ortega F., y Morales M. 1998. Participación de la arcilla y la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico de vertisoles de la provincia de Granma. *Terra.* 16: 189-194.
- Quian P., Schoenau J., Greer K., and Liu Z. 1996. Assessing plant-available potassium in soil using cation exchange membrane burial. *Can. J. Soil Sci.* 76: 191-194.
- Quian P., and Schoenau J. J. 1997. Recent developments in use of ion exchange membranes in agricultural and environmental research. *Recen Res Devel. In Soil Science.* 1. 43-54.
- Roca-Jove M. C., and Vallejo-Calzada V. R. 2000. Predicting radiocaesium root uptake based on potassium uptake parameters. A mechanistic approach. *Plant and Soil* 222: 35- 49.

Sabbe W. E., and Marx D. B. 1987. Soil Sampling: Spatial and Temporal Variability. *In*: Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation. Brown J.R. (ed). SSSA Special Publication Num. 21. Madison Wisconsin, USA. pp 1-14.

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. 69 p.

Schoenau J. J., Quian P., and Huang W. Z. 1993. Ion exchange resin strips as plant root simulators. Proc. Soil and crops workshop. University of Saskatchewan, Saskatoon. Canada. pp 392 - 400

Schneider A. 2003. Characterization of soil potassium supply as derived from sorption-desorption experiments. *Plant and Soil*. 251: 331-341.

Schneider A. 1997. Influence of soil solution Ca concentration on short-term K release and fixation of a loamy soil. *European J. of Soil Science*. 48: 513-522.

SDR. Secretaria de Desarrollo Rural. 1997. Experiencias obtenidas en el cultivo de papaya maradol en el estado. Gobierno del estado de Yucatán. México. 115 p.

Shang C., and Tiessen H. 2003. Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. *Biochemistry*. 62: 177-196

Smethurst P. J., and Comerford N. B. 1993. Potassium and phosphorus uptake by competing pine and grass: Observations and model verification. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 57: 1602-1610.

Soil Survey Staff. 1995. Claves para la taxonomía de suelos, versión 1994. Traducido al español por C. A. Ortiz Solorio y M. del C. Gutiérrez Castoreña. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial 3. Chapingo, México. 306 p.

Soria F., Tun J., Trejo A., y Terán R. 2000. Tecnología para la producción de hortalizas a cielo abierto en la Península de Yucatán. SEP. DGTA. ITA-2 Conkal, Yuc, México. 416 p.

Soria M., Tun J., Trejo A., y Terán R. 2002. Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). SEP. DGTA. ITA-2 Conkal, Yuc, México. 75 p.

Sparks D. L., and Jardine P. M. 1984. Comparison of kinetic equation to describe K-Ca exchange in pure and in mixed systems. *Soil Sci*. 138: 115-122.

- Sparks D. L., and Huang P.M. 1985. Physical Chemistry of Soil Potassium. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp 201-276.
- Thomas G. W. 1986. Cationic exchange capacity. *In: Methods of soil analysis*, A. L. Page Miller, R. H., and Keeney D. R. (eds). Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy 9. 2nd ed. Madison, Wisconsin, USA. pp. 159-164.
- Tinker P. B., and Nye P. H. 2000. Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press. New York, USA. 444 p.
- Van Rees K. C. J., Comerford N. B., and Rao P. S. C. 1990. Defining soil buffer power: implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling. *Soil Sci Am.J.* 54: 1505-1507.
- Wang J. J., Harrel D. L., and Bell P. F. 2004. Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil. Sci. Am. J.* 68: 654-661.
- Wilson E. M. 1980. Physical geography of the Yucatan peninsula. *In: Yucatan a world apart*. Moseley E. H., and Terry E.D. (ed). University of Alabama. Tuscaloosa, Alabama, USA. pp. 5-40.

Capítulo 3

CINÉTICA DE LA ABSORCIÓN DE POTASIO POR LAS RAICES DE CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq.)

Kinetics Of Potassium Absorption By Habanero Chili Roots (*Capsicum chinense* Jacq.)

Lizette Borges Gomez¹, Armando Escamilla Bencomo¹, Fátima Medina Lara¹, Josué Chuc-Puc²

El presente capítulo se presenta en la forma de artículo que ha sido aceptado para ser publicado en la revista Agrociencia.

RESUMEN

Se determinó la velocidad máxima de absorción de K (I_{max}) y la constante de Michaelis-Menten (K_m) en plantas intactas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) utilizando la técnica de agotamiento. Para ello, las plantas se pusieron en ausencia de K y posteriormente en soluciones de 0, 2, 4, 6 y 8 mM de K⁺. El agotamiento de K⁺ fue medido cada 30 min hasta los 210 min. Se midió el área superficial de raíz para obtener el agotamiento por cm². Los resultados analizados por regresión simple se ajustaron a un modelo exponencial mostrando diferencias ($p \leq 0.001$) entre las soluciones. La absorción de K por unidad de tiempo fue ajustada

¹Centro de Investigación Científica de Yucatán. Calle 43 No.130 Col. Chuburná de Hidalgo. CP 97200. Mérida, Yuc. e-mail lizette_borges@hotmail.com

² Instituto Tecnológico de Conkal, Yucatán. Km 16.3 antigua carr. Mérida-Motul.

por mínimos cuadrados para obtener I_{\max} y K_m . No hubo diferencias en I_{\max} pero sí de K_m , indicando una misma velocidad máxima de absorción aun a diferentes concentraciones de K^+ en la solución. Con la integración de las diferentes concentraciones de K se tuvo un valor único de K_m (1.15 mM) y de I_{\max} ($4.7E-04 \mu M \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) los cuales pueden ser utilizados para estimar la absorción de K de chile habanero en campo a través de la concentración de K^+ en la solución del suelo y el área superficial radicular en diferentes etapas de desarrollo.

Palabras claves: *Capsicum chinense*, absorción de potasio, constante de Michaelis-Menten, velocidad máxima de absorción

ABSTRACT

The maximum rate of K^+ absorption (I_{\max}) and the Michaelis-Menten constant (K_m) were determined in intact habanero chili plants using the depletion technique. Plants were placed in absence of K and subsequently in solutions of 0, 2, 4, 6 and 8 mM of K^+ . Depletion of K^+ was measured every 30 min up to 210 min. The root surface area was measured in order to obtain the depletion per cm^2 . The results analyzed by simple regression were fitted to an exponential model showing differences ($p \leq 0.001$) between solutions. K absorption per unit of time was adjusted by minimum square to obtain I_{\max} and K_m . There were no differences in I_{\max} , but K_m did show differences indicating a similar maximum rate of absorption at different K^+ concentrations in the solution. With the integration of different K^+ concentrations, a single value of I_{\max} ($4.7E-04 \mu M \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and K_m (1.15 mM) was obtained which can be used to estimate the K^+ absorption by habanero chili in the field through the K^+ concentration in the soil solution and the root surface area in different stages of development.

Key words: *Capsicum chinense*, potassium uptake, Michaelis-Menten constant, maximal influx rate

INTRODUCCIÓN

La absorción de K^+ por las plantas está determinada por la concentración en la solución del suelo y por la capacidad de absorción radicular. La relación entre la concentración en la solución externa y la tasa de absorción se conoce como isoterma y la representación gráfica es semejante a una hipérbola (Tinker & Nye, 2000). Generalmente la tasa de absorción incrementa con la concentración en la solución; sin embargo, existe una velocidad máxima de absorción en la cual mayores aumentos en la concentración ya no generan un incremento en la velocidad de absorción. De aquí surge la aplicación de la hipótesis de la cinética enzimática como un mecanismo de absorción de iones. Esta aplicación, fue desarrollada por Epstein & Hagen en 1952, y se basa en que cinéticamente, el proceso de catálisis enzimática y del transporte de iones por las membranas celulares son similares, y se fundamenta en la unión transitoria a los sitios activos de los agentes enzima-sustrato, como puede ser transportador-ión de la solución del suelo. De acuerdo con la ecuación de la cinética enzimática, la ecuación para expresar la velocidad de absorción de iones es (Claassen & Barber, 1974):

$$I = I_{\max} C_s / K_m + C_s \quad (1)$$

donde I es el influjo; I_{\max} la tasa máxima de toma de nutrientes; C_s la concentración del ión; K_m la constante de Michaelis-Menten, que es igual a la concentración del ión a 0.5 de I_{\max} .

Los valores de I_{\max} de la ecuación (1) denotan la velocidad máxima de transporte a través de la membrana cuando todos los acarreadores se encuentran ocupados, por lo tanto su valor está dado por el número de transportadores en la membrana y por sus características. K_m denota la afinidad de los transportadores hacia el ión, y cuanto mayor sea el valor de K_m , menor será la afinidad de los iones hacia los transportadores (Marschner, 1995; Leigh, 2001). Esto quiere decir que un valor bajo de K_m significa una mayor sensibilidad para la toma de iones.

Hasta el momento no se ha reportado la concentración de K en la solución del suelo en la cual se tiene la tasa máxima de absorción por raíces de chile habanero. Se han reportado diferentes recomendaciones de fertilización de K (Tun, 2001; Soria *et al.*,

2002); sin embargo, se desconoce cuál es la concentración obtenida en la disolución del fertilizante y cuál ha sido la tasa de absorción por las raíces.

El conocimiento de la concentración de K en solución en la cual ya no existe un incremento en la absorción del ión, podría considerarse un punto de partida para definir recomendaciones de fertilización. Este es el primer estudio en el que mediante las aplicaciones de la cinética enzimática de Michaelis-Menten se evalúa la velocidad máxima de absorción de K (I_{max}) por raíces intactas de chile habanero y la afinidad de los transportadores (K_m), siendo éste el principal objetivo del presente trabajo.

METODOLOGÍA

Material vegetal y acondicionamiento de las plántulas

Se utilizaron plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) de 45 días de edad de la variedad criolla naranja; éstas, fueron removidas de su contenedor para eliminar el sustrato en el que habían desarrollado. Posteriormente, fueron puestas en adaptación en solución nutritiva de Hoagland, y después sometidas a hambruna de K por 48 horas utilizando solución de Hoagland en ausencia de K. Transcurrido este tiempo, las plántulas se pusieron en grupos de 10 en 250 mL de solución de Hoagland con concentraciones de 0, 2, 4, 6 y 8 mM de K. Cada grupo tuvo tres repeticiones para un total de 150 plántulas (Figura 3.1).

Determinación de las curvas de agotamiento

El K^+ absorbido por las plantas se obtuvo por el método de agotamiento de Claassen & Barber (1974). Este método requiere que las plantas estén en una solución de volumen constante, el decremento de un ión en la solución indica la cantidad de ión absorbido (I = influjo) y está dada por la ecuación:

$$Q = c \cdot v$$

(2)

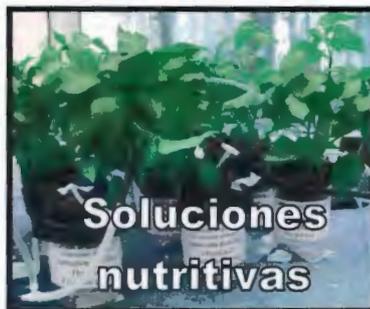
donde Q es la cantidad del ión en la solución; c la concentración del ión; v el volumen de la solución.

Cuando se grafica Q contra t (tiempo) se obtiene la curva de la tasa de agotamiento del ión. Para obtener la tasa de agotamiento de las diferentes concentraciones de K, se tomaron $500 \mu\text{L}$ de las soluciones cada 30 min, para un total de siete muestreos en 210 min. El volumen tomado fue repuesto con agua destilada para mantener un volumen constante. Se supone que no existieron pérdidas por evaporación ni por transpiración, ya que el muestreo se realizó en las primeras horas del día. Las concentraciones de K fueron determinadas por espectroscopia de absorción atómica con un equipo Perkin Elmer 3100TM.

a) Plantas en solución de Hoagland



b) Plantas en solución de Hoagland con ausencia de K



c) Plantas en solución de Hoagland con diferentes concentraciones de K

Figura 3.1 Evaluación del agotamiento de la absorción de K^+ por las raíces de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

Estimación de la velocidad de absorción de K

La velocidad de absorción de K se obtuvo a partir de la diferencia en concentración por unidad de tiempo y del área superficial radicular de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V = [(C_1 - C_2) / (t_1 - t_2)] / A_r \quad (3)$$

donde V es velocidad de absorción ($\text{mM cm}^{-2}\text{s}^{-1}$); C_1 la concentración de la solución en el tiempo inicial (t_1); C_2 la concentración al tiempo final (t_2); A_r el área superficial de la raíz.

Estimación del área superficial radicular

Después de evaluar el agotamiento de K^+ , las plántulas se retiraron de las soluciones. Las raíces se separaron de la parte aérea y se tñieron con una solución de rojo congo a 0.5% durante 10 min. Posteriormente, se extendieron en un recipiente transparente y la imagen fue digitalizada utilizando el programa RootEdge Ver. 2.3 (Ewing & Kaspar, 1995). La longitud y radio de las raíces obtenidos se utilizaron para calcular el área superficial con la ecuación:

$$A_r = 2\pi r_o L \quad (4)$$

donde A_r es el área superficial de la raíz; r_o el radio de la raíz; L la longitud de raíz.

Obtención de I_{\max} y K_m

El K absorbido obtenido en las curvas de agotamiento por unidad de tiempo (s), fue dividido entre el área superficial de raíz para obtener la absorción de K en $\mu\text{mol cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Los valores se graficaron con las diferentes soluciones de K, y las curvas obtenidas se ajustaron a la ecuación cinética de Michaelis-Menten. I_{\max} y K_m se determinaron por el método de mínimos cuadrados con el programa KyPlot (Yoshioka, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del tiempo sobre el agotamiento de potasio

Las curvas de agotamiento del influjo de K vs tiempo, se ajustaron a un modelo exponencial mostrando diferencias significativas ($p \leq 0.001$), indicando una relación de moderada a relativamente fuerte entre el agotamiento de K con el tiempo (Cuadro 1). Diferentes estudios han demostrado que cuando se restringe un nutrimento por un tiempo, la tasa de absorción es más rápida; este incremento es selectivo y sólo ocurre para el ión restringido (Peterson y Kasimir-Klemedtsson, 1990).

Cuadro 3.1. Medidas de tendencia central y dispersión en el agotamiento de potasio, durante 210 min, por plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en soluciones con diferentes concentraciones de potasio.

Resumen estadístico	SOLUCIONES DE K (mM)			
	2	4	6	8
C_{\max} (mM)	1.80	3.54	5.40	6.70
C_{\min} (mM)	1.47	2.79	4.19	6.62
Varianza	0.009	0.02	0.12	0.09
CM	0.12	0.094	0.14	0.059
ϵ	0.021	0.035	0.075	0.066
Modelo	$y=0.53e^{-0.001x}$	$y=1.22e^{-0.0009x}$	$y=1.68e^{-0.001x}$	$y=1.9e^{-0.0007x}$
Valor F	35.65**	64.26**	139.66**	186.51**
r	-0.79	-0.86	-0.93	-0.95
CV(%)	6.5	5.2	7.3	4.9

C_{\max} =Concentración inicial de K; C_{\min} =Concentración final de K; CM=Cuadrado medio; ϵ =Error estándar; CV=Coficiente de variación ** altamente significativo ($p \leq 0.001$)

La cantidad de K^+ agotado en 210 min fue 0.3, 0.73, 1.1 y 0.95 mM en las soluciones 2, 4, 6 y 8 mM respectivamente (Figura 3.2). Las diferencias en el agotamiento de K^+ se deben a la proporción de raíz presente en cada solución. La superficie de la raíz en contacto con las soluciones externa de 2, 4, 6 y 8 mM fue 274, 250, 295 y 178 cm^2 , respectivamente. Considerando la superficie de contacto, la cantidad total de K^+ agotado por cm^2 de raíz mostró diferencias ($p \leq 0.001$), siendo la cantidad total agotada de 1, 3, 4 y 5 $\mu M cm^2$ para las concentraciones evaluadas de 2, 4, 6 y 8 mM, respectivamente. Estos resultados muestran que la absorción de K aumenta conforme aumenta la concentración en la solución externa; sin embargo, como se verá más adelante el aumento en la concentración no mostró un aumento en la velocidad de absorción.

La concentración del ión en la solución externa de la cual se parte es definitiva para cuantificar el agotamiento en términos de porcentaje. Classen & Barber (1974) reportaron el agotamiento total de una solución de 190 μM de K en tan sólo 200 min en plántulas de maíz, cuando éstas fueron desarrolladas previamente en una solución de 0.5 mM de K. Por su parte, Drew *et al.* (1984) evaluaron el agotamiento de 100 μM de K en plantas de cebada puestas a 0, 1 y 4 días en hambruna de K y reportaron que 100% de agotamiento se obtiene a los 300, 180 y 90 min, respectivamente.

Las bajas proporciones de K^+ agotado en chile habanero en un tiempo de 210 min, se debieron a que se utilizaron concentraciones altas de K^+ . Estas concentraciones se eligieron con base a las recomendaciones de fertilización potásica para este cultivo. Por otra parte, el tiempo de hambruna de K^+ y las concentraciones utilizada, son condiciones que pueden ocurrir a partir de la solución del suelo cuando se presentan limitaciones en la difusión de K a través de la solución de suelo antes de alcanzar la superficie de la raíz (Tinker & Nye, 2000), o cuando se presentan periodos prolongados entre la dosificación de fertilizantes.

Dado que situaciones de estrés inducido modifican la habilidad de las raíces para transportar iones al interior, estos cambios pueden ser de importancia para definir frecuencia de incorporación de K al suelo (Willigen *et al.*, 2000).

Absorción de potasio en soluciones con diferente concentración

La cinética de absorción de K en los campos de concentración estudiados mostraron una respuesta positiva (Figura 3.3). En los primeros 60 min, la absorción de K^+ en cualquier rango de concentración evaluada no fue significativa; sin embargo, después

de este tiempo la absorción fue diferente ($p \leq 0.001$). En la figura 3.3 se observa que la absorción de K aumenta a medida que lo hace la concentración de K en la solución, coincidiendo con Jensén *et al.* (1987) al señalar que la tasa de absorción de un ión está relacionada con la concentración de este en la solución

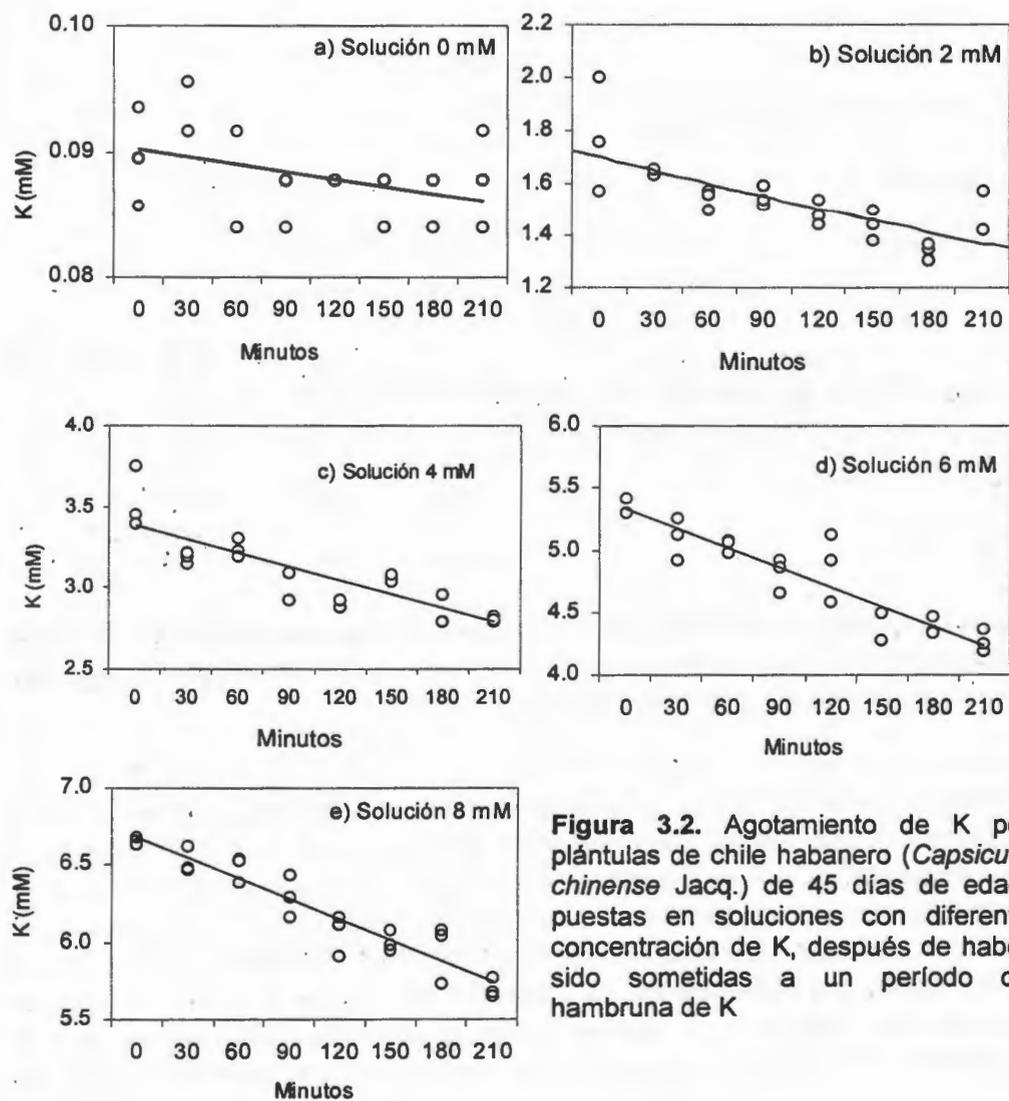


Figura 3.2. Agotamiento de K por plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) de 45 días de edad, puestas en soluciones con diferente concentración de K, después de haber sido sometidas a un período de hambruna de K

En estudios de absorción resulta difícil definir las mejores concentraciones de K en solución. Maathuis & Sanders (1996) señalan que en varias especies es posible observar la absorción de K a concentraciones menores a $1 \mu\text{M}$, mientras que Sheahan *et al.* (1993) indican que en algunas especies la concentración de K en la solución se observa a concentraciones de 50 a 100 mM.

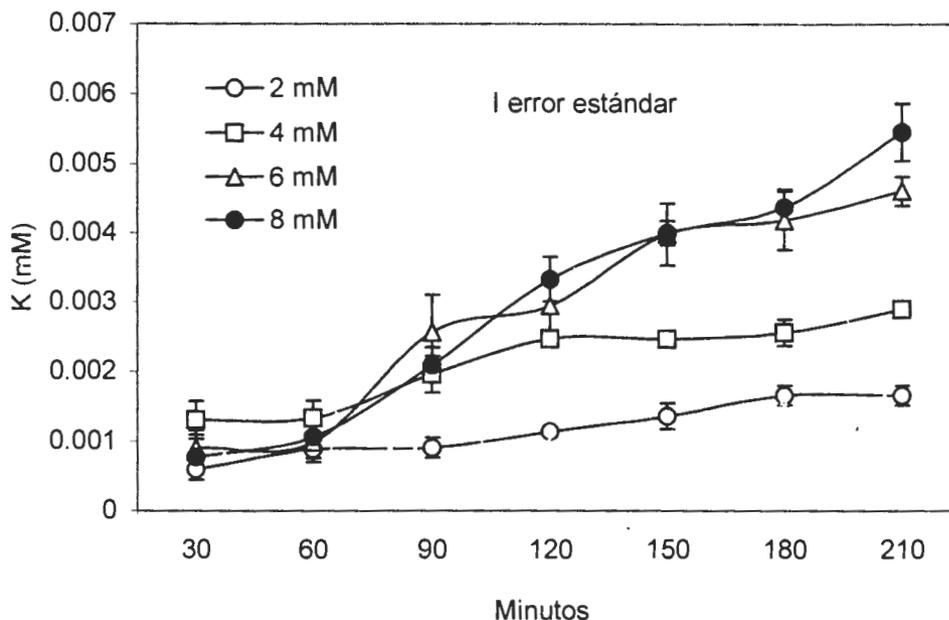


Figura 3.3. Cinética de absorción de K por unidad de área superficial (cm²) de raíz de plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), de 45 días de edad, puestas en soluciones nutritivas con diferente concentración de K⁺

Las plántulas en 0 mM de K⁺ mostraron liberación de éste ion a la solución externa en los primeros 30 min (Figura 3.2a); este es un fenómeno conocido como exflujo, en el que a través del proceso de difusión, el K pasa de la raíz a la solución (Engels *et al.*, 2000). Esto indica la exigencia de una concentración mínima de K en la solución del suelo para que ocurra una absorción efectiva. El análisis químico de la solución de 0 mM K⁺ reportó una concentración de 0.089 ± 0.003 mM de K⁺ como resultado de impurezas de materiales y agentes químicos utilizados; esto sugiere que la concentración mínima de K⁺ presente en la solución debe ser superior a 0.089 mM

para impedir la liberación de K^+ a la solución externa, aunque en este momento el influjo (I) o absorción neta de K todavía no ocurre. Estos resultados muestran que las exigencias del chile habanero para que se lleve a cabo la absorción de K^+ son superiores a una concentración de 0.089 mM de K de la solución en contacto con la superficie radicular. De acuerdo a Wild (1989), las exigencias de concentración de la solución externa depende de la tasa de crecimiento de las diferentes especies, así, mientras las exigencias del ray-grass (*Lolium perenne*) son menores a 1.3×10^{-3} mM de K^+ , en rábano forrajero son de 0.1 mM.

Velocidad máxima de absorción y constante de Michaelis de potasio

La velocidad máxima de absorción de K^+ (I_{max}) en las soluciones de K no mostraron diferencias significativas, esto quiere decir que en un rango de concentración de 2 a 8mM de K se tiene una misma velocidad máxima de absorción de K (Cuadro 3.2).

Aun cuando I_{max} fue igual para los rangos de concentraciones evaluadas, el valor de K_m fue diferente para cada solución ($p \leq 0.001$). Sin embargo, las diferencias de K_m fueron minimas (entre 6 y 12%) siendo el promedio global de 1.17 mM. Glass (1976) señala que cuando se observan cambios en I_{max} éstos pueden deberse a una mayor producción de proteínas de transporte, pero cuando los cambios ocurren en K_m éstos pueden ser atribuibles a cambios en la estructura de los transporte tales como cambios alostéricos (Rubio *et al.*, 2004), o por activación de genes que producen un diferente tipo de proteína. Es posible también que los cambios en el mecanismo de absorción se deban a cambios en número de alguno de los tipos de proteínas de transporte: proteínas catalíticas, proteínas que forman canales y proteínas transportadoras.

Los primeros estudios de cinética de absorción de K realizados por Epstein (1966) señalaron dos tipos de mecanismos de absorción; el mecanismo I, con una K_m baja, es decir con una alta afinidad para los iones, y cuya saturación ocurre cuando la solución externa es menor a 1 mM; y el mecanismo II con una K_m alta, es decir con baja afinidad y la saturación ocurre a concentraciones mayores de 1 mM, ambos mecanismos se llevan a cabo en la membrana plasmática. Los resultados obtenidos de K_m en chile habanero corresponden al mecanismo de baja afinidad debido al rango de concentraciones de K evaluadas, no obstante se observa que a menores concentraciones de la solución externa se tiene mayor afinidad hacia los iones. Este tipo de mecanismo ha sido descrito en diferentes cultivos y se considera importante en el manejo de fertilizantes (Barber, 1984; Tinker y Nye, 2000).

Cuadro 3.2. Comparación de medias de la velocidad máxima de absorción de K (I_{max}) y constante de Michelis-Menten (K_m) en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) de 45 días de edad

Solución de K	K_m	I_{max}
	MM	$\mu\text{M cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
2 mM	1.11 a	3.3E-04 a
4 mM	1.14 b	5.1E-04 a
6 mM	1.19 c	5.0E-04 a
8 mM	1.27 d	4.8E-04 a
C.V. (%)	5	24

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a un $P \leq 0.05$.

Cuando se integra la tasa de agotamiento de las soluciones evaluadas para obtener la isoterma de absorción de K por unidad de superficie de raíz, se obtiene la Figura 3.4, la cual muestra los valores ajustados por mínimos cuadrados de I_{max} y K_m . El valor de la velocidad máxima de absorción (I_{max}) fue $4.7\text{E-}04 \mu\text{M cm}^2\text{s}^{-1}$. Este valor sugiere que una concentración de 18.3 mg L^{-1} de K en la solución del suelo es la cantidad de K que puede absorber 1 cm^2 de raíz de chile habanero por cada segundo, por lo que sólo en suelos que pueden mantener una alta concentración de K en la solución del suelo, las raíces de chile habanero podrían alcanzar su máxima capacidad de absorción. Dado que la absorción de iones presenta características de cinética de saturación (Marschner, 1995), el valor de I_{max} obtenido indica que todos los acarreadores se encuentran ocupados. En esos casos la velocidad de absorción adquiere un valor asintótico debido a la saturación de los transportadores (Barceló *et al.*, 1995). Por otra parte, el valor de K_m (1.15 mM) indica que la absorción ocurre por el mecanismo de baja afinidad (Mecanismo II). Existen evidencias de que K_m es afectado por factores genéticos de la planta y por factores ambientales; cuando los cultivos son establecidos en el campo y se tiene en la solución del suelo concentraciones cercanas a su K_m , las plantas crecen a una tasa relativamente alta, siempre y cuando no se tengan otros factores limitativos (Bloom *et al.*, 1993).

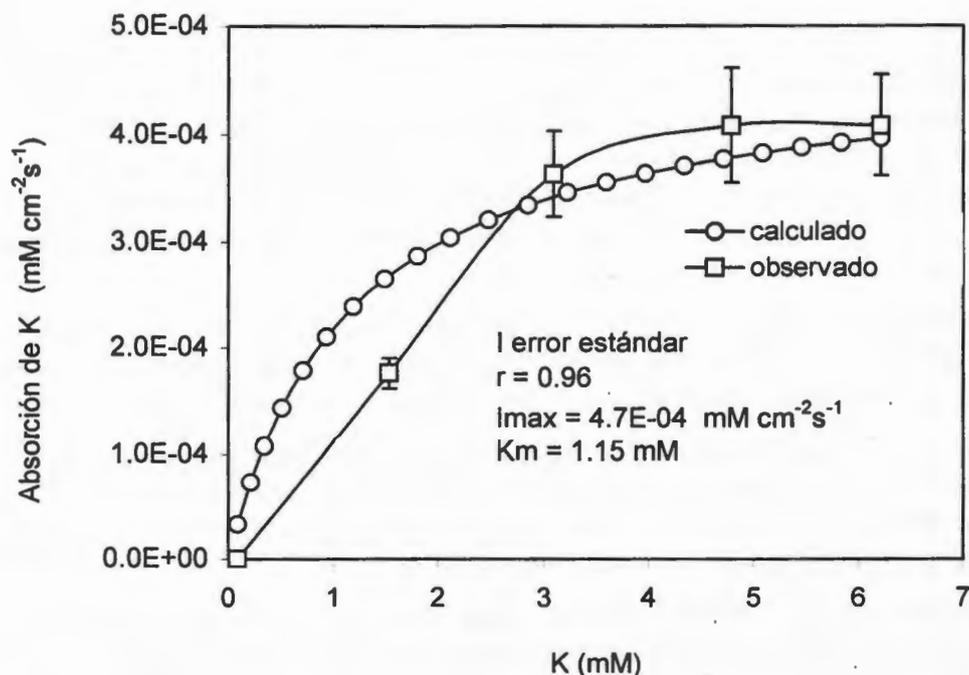


Figura 3. Absorción de K^+ por plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) de 45 días de edad. Las plantas fueron puestas en solución de Hoagland con diferentes concentraciones de K después de estar por 48 horas en ausencia de K. La toma de K se evaluó cada 30min durante un tiempo de 210min. (n=150)

Numerosos estudios han sido desarrollados sobre los mecanismos de absorción de nutrientes como nitrógeno fósforo y elementos menores, Tinker & Nye (2000) citan resultados obtenidos en trigo, maíz, soya y cebada, entre otros. En K, estudios de la cinética de absorción han sido realizados en palmas (Quintal, 2003); en diferentes especies leñosas (Kelly *et al.*, 2001); en gramíneas (Mmolawa & Or, 2000); en leguminosas (Roca-Jove & Vallejo-Calzada, 2000); Desafortunadamente no se han documentado trabajos sobre la cinética de absorción en especies hortícolas obtenidos de estudios realizados en raíces intactas, y éstos son los primeros datos reportados de K_m y de I_{max} para el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

CONCLUSIONES

La absorción de K^+ por cm^2 de raíz aumenta con la concentración de K de la solución externa, pero la velocidad máxima de absorción no se afecta por las concentraciones de las soluciones externas de K (2, 4, 6 y 8mM). Estos resultados pueden ser útiles para prevenir pérdidas de K cuando éste se incorpora al suelo en concentraciones que pueden no ser aprovechadas por la planta y lixiviadas antes de alcanzar la superficie de la raíz.

Los valores de I_{max} y K_m pueden utilizarse para predecir la absorción de K^+ durante el ciclo del cultivo de acuerdo con la concentración de K^+ en la solución del suelo y al incremento del área superficial radicular en proporción al desarrollo de la planta.

Cuando la concentración externa de la solución en contacto con la raíz es 3.5 mgL^{-1} de K, se produce exflujo o liberación de K^+ de la raíz hacia la solución, por lo que solamente los suelos que puedan mantener una concentración superior a ésta en la solución del suelo podría ocurrir la toma de K^+ .

El valor de K_m (1.15mM) indica un mecanismo de baja afinidad (mecanismo II), y conforme disminuye la concentración externa aumenta la sensibilidad para la toma de K^+ .

REFERENCIAS

- Barber, S., A. 1984. Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach. Jhon Wiley & Sons. New York. 398 p.
- Barceló C. J., Nicolás G. R., Sabater G. B., y R. Sánchez T. R. 1995. Fisiología Vegetal. Ediciones Pirámide. Espuma. pp: 108-124.
- Bloom A. J., Jackson L. E., and D.R. Smart. 1993. Root growth as a function of ammonium and nitrate in the root zone. *Plant Cell Environment*. 16: 199-206.
- Claassen N., and Barber S. A. 1974. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. *Plant Physiol*. 54: 564-568.
- Drew M. C., Saker L. R., Barber S. A., and Jenkins W.. 1984. Changes in the kinetics of phosphate and potassium absorption in nutrient-deficient barley roots measured by solution-depletion technique. *Planta*. 16: 490-499.
- Engeles Ch., Neumann G., Gahoonia T. S., George E., and Schenk M. 2000. Assessing the ability of roots for nutrient acquisition. *In: Root methods a handbook*. A. L. Smith, A. G Bengough, C. Engeles, M. Van Noordwijk, S. Pellerin and S. C. Van de Geijn (eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany pp 403-459.
- Epstein E., and Hagen C. E. 1952. A kinetic study of absorption of alkali cations by barley roots. *Plant Physiol*. 27: 457 -474
- Epstein E. 1966. Dual pattern of ion absorption by plant cells and by plants. *Nature*. 212: 1324-1327.
- Ewing R. P., and Kaspar T. C. 1995. Accurate perimeter and length measurement using edge chard algorithm. *J. Computer Assist Microsc*. 7: 91-100
- Glass A. D. M. 1976. Regulation of potassium absorption in barley roots: and allosteric model. *Plant Physiol*. 58: 33-37.
- Jensén P., Erdei L., and Moller I. A.. 1987. K⁺ uptake in plant roots: Experimental approach and influx models. *Physiologia Plantarum*. 70: 743-748.
- Kelly, J. M., J. D. Scarbrough,, and P. A. Mays. 2001. Harwood seedling root and nutrient parameters for a model of nutrient uptake. *J. Environ. Qual*. 30: 427-439.
- Leigh R., A. 2001. Potassium homeostasis and membrane transport. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 164: 193-198.

- Maathuis F. J., and Sanders D. 1996. Mechanism of potassium by higher plant root. *Physiologia Plantarum*. 96: 158-168.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants (2^{da} ed.). Academic Press. USA. 889 p.
- Mmolawa K., and Or D. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation. A review. *Plant and Soil*. 222: 163-190.
- Petersson S., and Kasimir-Klemedtsoon A. 1990. Influx and efflux of K⁺ in sunflower roots after transfer between solutions with different K⁺ concentrations. *Physiologia Plantarum* 79: 686-692.
- Quintal T. F. 2003. Absorción diferencial de potasio por las raíces de las palmas nativas de Yucatán: *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yuc. México. 105 p.
- Roca-Jove M. C., and Vallejo-Calzada R. 2000. Predicting radiocaesium root uptake based on potassium uptake parameters. A mechanistic approach. *Plant and Soil* 222: 35-49.
- Rubio L., Rosado A., Linares-Rueda A., Borsani O., García-Sánchez M. J., Valpuesta V., Fernández J. A., and Botella M. A. 2004. Regulation of K⁺ transport in tomato roots by the TSS1 locus. Implications in salt tolerance. *Plant Physiology*. 134: 452-459.
- Sheahan J. J., Ribeiro-Neto L., and Sussman M. R. 1993. Cesium insensitive mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Plant J*. 3: 647-656.
- Soria F., Tún J., Trejo A., y Terán R.. 2002. Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* J.). SEP. DGTA. ITA-2 Conkal, Yuc, México. 75 p.
- Tinker P. B., and Nye P. H. 2000. Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press. 444 p.
- Tun D. C. 2001. Características y Tecnología de Producción del chile habanero. SAGARPA. INIFAP-PRODUCE. Mérida Yuc. México. 74 p.
- Wild A., and Jones L. H. P.. 1992. Potasio, sodio, calcio, magnesio y azufre. *En: Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russel*. A. Wild. Mundi-Prensa. España. pp 783-818.
- Willigen N. E., Nielsen N., Claassen N., and Castrignano A. M. 2000. Modeling water and nutrient uptake. *In: Roots methods. A handbook*. A. L. Smit, C. Bengough, M. Engels, van Noordwijk, S. Pellerin, S. C. van de Geijn (eds). Springer. pp 509-544.

Yosioka K. 2001. KyPlot Software. V2.00 beta 14. 1997-2000[©]. www.quatest.co.jp

Capítulo 4

PREDICCIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE K⁺ EN LA PRODUCCIÓN DE CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq.) EN YUCATÁN

L. Borges-Gómez, A. Escamilla Bencomo, T. González Estrada y N. B. Comerford.

Parte de la información de este capítulo será sometido a la revista Plant and Soil

RESUMEN

Se utilizó el modelo Soil Supply and Nutrient Demand (SSAND), para predecir los requerimientos de K del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en quince suelos de Yucatán, de acuerdo a su potencial para suministrar K, y a la capacidad de las raíces para absorber el mismo. SSAND es un modelo mecanístico que simula el desarrollo del cultivo para diagnosticar limitaciones de nutrición y determinar los regímenes de fertilización necesarios para alcanzar las metas de producción. Su ejecución se basa en las teorías de difusión y de flujo de masas del nutrimento en el suelo, en las características de la raíz y en la cinética de absorción de los nutrimentos. Para su aplicación se utilizaron datos de experimentos realizados con anterioridad.

De acuerdo a las metas de producción propuestas (28 t ha⁻¹ de fruto), los resultados mostraron que los suelos requieren una aplicación de 108 a 150 kg ha⁻¹ de K, dependiendo la dosis del tipo de suelo. El momento oportuno de aplicación resultó ser fundamental para que el nutrimento sea aprovechado por la planta, mientras que en algunos suelos se requiere que la mayor cantidad de K sea aplicada durante los primeros 40 días de desarrollo de la planta, para otros, se sugiere que la incorporación

de K se realice durante todo el ciclo de cultivo (160 días). Las diferencias se atribuyen a las características de los suelos de retener el K incorporado y su posterior liberación para que éste sea absorbido por la planta.

Palabras claves: demanda nutrimental, simulación de absorción de K, fertilización.

ABSTRACT

In order to predict the requirements of K of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq) in fifteen soils of Yucatán, according to their potential to supply K and the root ability to absorb it, a simulation model, Soil Supply and Nutrient Demand (SSAND) was used.

SSAND is a mechanistic model that simulates crop development to diagnose limitations of nutrition and to determine nutrient requirements to reach the goals of production.

The model execution is based on the theories of diffusion and mass flow of nutriment in the soil and on root characteristics and its kinetics of nutrients absorption.

Experimental data from previously carried out and field experiment were used to run the model.

According to the proposed production of 28 t ha⁻¹ of fresh fruit, the model results showed that the soils required an application of 108 to 150 kg ha⁻¹ of K, depending on the soil type. The opportune time of application was fundamental in order for the plant to absorb the nutrient and take advantage of the application. Some soils required that most of K was applied during the first 40 days of plant development; in contrast, the other soils, the model suggested that the incorporation of K was carried out during the whole cycle of cultivation (160 days). The differences in time of application are attributed to the soils characteristics of retaining incorporated K and their capacity to release it and make it available to the plant for absorption.

Key words: nutrient demand, simulation potassium uptake, fertilization.

INTRODUCCIÓN

Las variadas condiciones edáficas que caracterizan al estado de Yucatán han propiciado una gran diversidad de respuestas en la producción de cultivos. En general, las recomendaciones de fertilización en el manejo intensivo de cultivos se basan principalmente en ensayos de prueba y error de la experimentación en el campo (Bowen & Jeramillo, 1977; Le *et al.*, 1998), o bien, en resultados de laboratorio de análisis de suelos y foliares (Volke *et al.*, 1998). Sin embargo, las recomendaciones generadas por este medio son muy específicas para cada región, convirtiéndolas en técnicas de naturaleza empírica.

Para la producción de chile habanero en el estado de Yucatán, se conocen diferentes recomendaciones de fertilización potásica. Por ejemplo, Tun (2001) señala que el requerimiento de K, independientemente se trate de suelos pedregosos o profundos es de 120 kg ha⁻¹. Por su parte, para estos mismos suelos, Soria *et al.*, (2002) mencionan que la aplicación de 150 kg ha⁻¹ de potasio son necesarias para producir un mínimo de 18 t de fruto. Otras recomendaciones señalan que al incorporar 200 kg ha⁻¹ de K sobre una mezcla de suelo:cerdaza en proporción de 80:20 v/v se producen 27 t ha⁻¹ de fruto (López, 2003). Lo cierto es que la experiencia en campo ha demostrado que las recomendaciones de fertilización no siempre corresponden a las necesidades de los cultivos y esto se ve reflejado en las fluctuaciones en la producción de fruto.

En general, de acuerdo a Tun (2001), el potencial de los suelos de Yucatán para la producción de chile habanero bajo condiciones de riego se clasifica en no aptos, bajos, medio y alto, siendo los de mayor superficie los de mediano y bajo potencial. Dicha potencialidad fue determinada principalmente por la clase de suelo y la temperatura media anual. Sin embargo, para determinar la potencialidad del suelo para la producción de chile habanero, es importante considerar los factores involucrados en su capacidad para suministrar nutrientes (Barber, 1984; Tinker & Nye, 2000), y la capacidad de las raíces para absorber los mismos (Comerford, 1999). Los datos obtenidos en la evaluación de ambos procesos pueden ser utilizados en modelos de simulación para predecir la absorción de nutrientes.

El modelo Demanda Nutricional y Suministro del Suelo "SSAND" (por sus siglas en inglés) es un modelo de simulación basado en los procesos que controlan la absorción de nutrientes por las raíces de la planta y en los factores involucrados en el suministro de nutrientes por el suelo (Li & Comerford, 2000). Sus aplicaciones

permiten simular la absorción de nutrientes bajo condiciones cambiantes del suelo y de la planta. Permite además, diseñar regímenes óptimos de fertilización, ya que puede compararse la demanda nutricional con los resultados de la simulación de absorción de nutrientes (Figura 4.1); si la fertilización propuesta en la simulación no satisface la demanda por el cultivo, nuevos eventos de fertilización pueden ser definidos.

Este trabajo presenta la aplicación de éste modelo para predecir los requerimientos de K del chile habanero en diferentes suelos de Yucatán

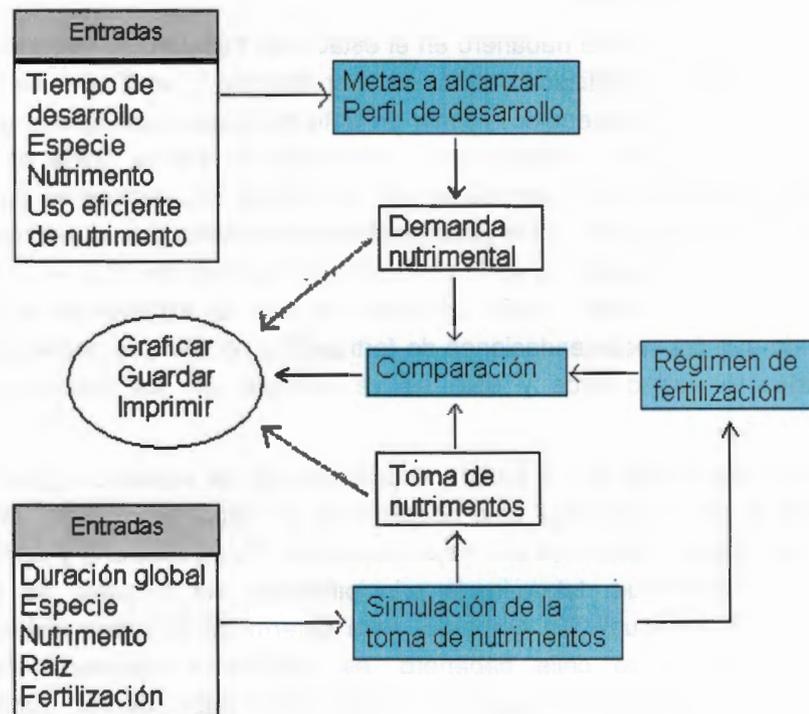


Figura 4.1. Diagrama de interacción de ejecución del modelo SSAND.

METODOLOGÍA

Modelo SSAND

El modelo SSAND está escrito en Microsoft Visual Basic 6.0, y utiliza hojas de cálculo en Microsoft Excel y archivos de texto para introducir los datos requeridos por el modelo. Al ejecutar el modelo, los datos arrojados se proporcionan igualmente en archivos de texto y en hojas de cálculo de Excel.

Los parámetros del suelo para predecir el suministro de K son: volumen de suelo, concentración inicial de K, densidad aparente, contenido de agua, difusión del nutrimento en el agua, factor de impedancia y características de la isoterma de adsorción y desorción de K.

Los parámetros de la planta para simular la demanda nutrimental son: velocidad del influjo de agua hacia la raíz, promedio del radio de la raíz, densidad de longitud de la raíz y los parámetros de la cinética de absorción de K (I_{max} y K_m).

Los parámetros de suelo y de la planta utilizados en el modelo SSAND fueron los reportados con anterioridad en los capítulos 2, 3 y 4. Se utilizaron además, datos reportados en la literatura para correr el modelo.

Los cuatro pasos principales para la aplicación de SSAND son: i) Definir el perfil de desarrollo deseado de la planta, ii) Simulación de la toma de nutrimento, iii) Comparación entre la simulación y la toma de nutrimento, y iv) Régimen de fertilización (Figura 4.2).

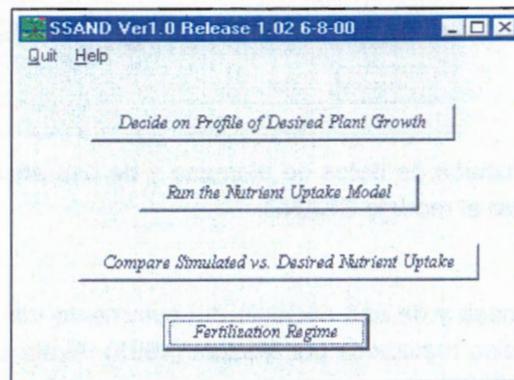


Figura 4.2. Menú principal de aplicaciones del modelo de simulación SSAND.

I. Perfil de Desarrollo de la Planta

En este paso, se introducen al modelo las metas por alcanzar en la producción del cultivo. Los datos introducidos fueron: i) producción de biomasa durante el tiempo de desarrollo y ii) uso eficiente del nutrimento (NUE), el cual se refiere a la cantidad del nutrimento por unidad de peso en la producción de biomasa. Ambos datos se utilizaron para generar la demanda nutrimental (ND) necesaria para alcanzar las metas de producción (Figura 4.3).

Define Desired Plant Growth Profile

Nutrient Demand (ND) for Desired Plant Growth (DPG)

Output Units for Nutrient Demand
 kg/ha lbs/acre ug/(total soil vol)

Age units used in Biomass and NUE files
 year month day

Start Age (day) End Age (day)

Nutrient Utilization Efficiency (NUE)

NUE DataBank

Species
Nutrient

Find DPG

Biomass file
 Use Env. Variables
 Use LAI

Biomass File Growth Units
 kg/ha
 lbs/acre
 ug/(total soil vol)

BioMass File

Species

Computed Result

Age 160 (day)
NUE 1.22E+02
DPG 9.44E+03 (kg/ha)
ND 7.71E+01 (kg/ha)

Figura 4.3. Introducción de datos de biomasa y de uso eficiente del nutrimento por la planta para ejecutar el modelo SSAND.

Los datos de biomasa y de uso eficiente del nutrimento introducidos al modelo fueron con base en estudios realizados por Mazum (1995), Ayala *et al.* (1998), Borges y Noh (2001) y López (2003). La producción de biomasa fue estimada a partir de una densidad de siembra de 25 000 plantas por hectárea e incluye follaje, raíz y

rendimiento de fruto fresco de 28 t ha⁻¹. El uso eficiente de K esta expresado como óxido de K (K₂O), y el ciclo total del cultivo considerado fue de 160 días (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Producción de biomasa acumulada de chile habanero (kg ha⁻¹) en peso seco y extracción acumulada de K (K₂O kg ha⁻¹) introducidos al modelo SSAND

Base de datos del cultivo de chile habanero [†]		
Día	Biomasa	K
1	6	1.0
20	100	12.5
40	200	25.5
50	1110	83.8
75	3916	103.3
100	7480	111.2
120	8921	119.2
140	9621	122.4
150	9563	123.2
160	9436	122.4

[†]Promedio de valores reportados en la literatura (Mazum, 1995; Ayala *et al.* 1998; Borges y Noh, 2001 y López, 2003)

II. Simulación de la Toma de Nutrimentos

En este paso, el modelo utiliza las teorías de difusión y de flujo de masas para estimar la capacidad de suministro del suelo y la habilidad de las raíces para tomar K. Para ello se utilizaron los parámetros de suelo y de raíz evaluados y reportados en los capítulos 2, 3 y 4, y con ello, obtener los resultados de la simulación o predicción de la toma de K por el cultivo.

Parámetros del suelo. La simulación de la toma de K fue realizada en 15 suelos con características diferentes. En el Cuadro 4.2 se describen los parámetros del suelo introducidos al modelo. Se utilizó además, el dato de coeficiente efectivo de difusión de K en el agua que es igual a $1.98 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ y el factor de impedancia, el cual describe el camino tortuoso que sigue el ion K en la solución del suelo a través de los poros. Para obtener el factor de impedancia se utilizó la ecuación (Van Rees *et al.*, 1990):

$$f = 3.1\theta^{1.9}$$

donde f , es el factor de impedancia y θ , es el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo.

Se asumió que la adsorción y desorción de K son simultáneamente reversibles por lo que se utilizó un mismo valor en las isotermas de adsorción y desorción. En la Figura 4.4a, se muestra la aplicación para introducir al modelo los datos del suelo.

Parámetros de la planta. Se utilizaron los datos de las características de la cinética de absorción de K de las raíces de chile habanero reportados en el capítulo 4, (Cuadro 4.3) y se utilizaron los valores reportados en la literatura de densidad de raíz (Borges y Noh,

2001). La tasa de absorción de agua se estimó por diferencia de peso de las plantas puestas en solución nutritiva de Hoagland de acuerdo a la metodología de Claassen y Barber (1974). En la Figura 4.4b, se muestra las aplicaciones para introducir al modelo los datos del suelo y de la planta.

III. Comparación entre la Simulación y la Toma de Nutrimiento

En este paso se compara la demanda nutrimental y la toma del nutrimento. La demanda nutrimental es el resultado del perfil de desarrollo que se pretende alcanzar y el uso eficiente del nutrimento, mientras que la toma de nutrimento es el resultado de la simulación realizada por el modelo. Si la predicción está por arriba de la demanda nutrimental, la interpretación es que la disponibilidad del nutrimento no es una limitante para obtener la productividad deseada. Si la toma de nutrimentos está por debajo, entonces la demanda nutrimental puede ser una limitante y una dosis de fertilización puede ser recomendada.

Cuadro 4.2. Parámetros de los suelos de Yucatán introducidos al modelo SSAND.

Suelo	Clase	C_i^\dagger	θ^\ddagger	D_a^\ddagger	K_d^\ddagger	Volumen [§]
	FAO	$\mu\text{g mL}^{-1}$	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	gcm^{-3}		dm^3
Akil	Cambisol crómico	2.7	0.332	0.86	90	90
Becanchen	Rendzina	14.0	0.688	0.88	37	37
Buctzotz	Cambisol calcárico	2.8	0.527	0.71	37	37
Cacalchen	Rendzina	0.8	0.298	0.81	71	71
El Cuyo	Rendzina	7.6	0.434	0.73	42	42
Chemax	Rendzina	6.0	0.535	0.76	39	39
Maxcanu	Luvisol vértico	30.5	0.404	0.84	20	20
Peto	Luvisol vértico	35.7	0.537	0.82	148	148
San Isidro	Vertisol Pélico	28.6	0.366	0.87	16	16
Tekit	Rendzina	2.5	0.285	0.74	47	47
Telchac Pbo	Leptosol	0.9	0.259	0.76	81	81
Temozon	Rendzina	23.0	0.540	0.81	38	38
Tizimin	Rendzina	3.9	0.555	0.83	51	51
Tzucacab	Luvisol vértico	91.7	0.486	0.87	32	32
Xul	Cambisol calcárico	12.8	0.536	0.90	50	50

[†]Concentración inicial de K en la solución de suelo. Datos tomados del capítulo 2.

[‡] θ es el contenido volumétrico de agua del suelo a capacidad de campo; D_a , es la densidad aparente; K_d , es la pendiente de la isoterma de desorción de K. Datos tomados del capítulo 3.

[§]Volumen del suelo obtenido con base a la profundidad de cada sitio de muestreo.

IV. Régimen de Fertilización

Este último paso permite probar diferentes regímenes de fertilización utilizando múltiples eventos y correr nuevamente la simulación. Para cada evento de fertilización se define el tiempo y dosis de incorporación del fertilizante. Cada régimen de

fertilización puede tener el número de eventos necesarios y después de realizar la simulación puede ejecutarse de nuevo el modelo y comparar la toma de nutrimentos con la demanda nutrimental. La dosis y frecuencia de incorporación del fertilizante puede modificarse el número de veces necesario hasta que la demanda nutrimental y la simulación de toma de nutrimentos sea similar. La Figura 4.5 muestra la aplicación del modelo para introducir el momento oportuno y la cantidad de K.

Cuadro 4.3. Características de la raíz y cinética de absorción de K del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) introducidos al modelo SSAND.

Parámetro	Valor
Tasa de absorción de agua ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	1.41E-06
Promedio de radio de raíz (cm) [†]	0.02
Densidad radicular (cm cm^{-3}) [‡]	0.4
I_{\max} ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) [†]	4.7E-04
K_m ($\mu\text{mol cm}^{-3}$) [†]	1.15

[†]Datos tomados del capítulo 4

[‡]Datos reportados en la literatura (Borges y Noh, 2001)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Demanda de potasio por el cultivo

De acuerdo al contenido de K y a la producción de biomasa introducidos al modelo, la demanda de K por la planta de chile habanero, a los 35 días de desarrollo de su establecimiento en el campo, fue aproximadamente 8 kg ha^{-1} (Figura 4.6) y aumenta, a medida que el cultivo crece hasta alcanzar la demanda máxima de 78 kg ha^{-1} a los 140 días. Posteriormente, la demanda disminuyó ligeramente al finalizar el ciclo del cultivo a los 160 días.

a)

Soil Inputs

Set 1

1. Volume [dm ³]	16	8. Impedence Formula	$f = a \cdot \theta^b$
2. Initial Soil Soln [(ug/ml)]	2.7	Parameter: a	3.1
3. Soil Water Content [cm ³ /cm ³]	0.332	Parameter: b	1.9
4. Soil Bulk Density [g/cm ³]	0.86	9. Desorption Type	FREUNDLICH
5. Diffusion Coefficient [cm ² /s]		Formula	$y = a \cdot x^{(1/b)}$
Nutrient	K	Parameter: a	90
Value	0.0000198	Parameter: b	1
6. Net Mineralization Rate		10. Adsorption Type	FREUNDLICH
Unit	kg/ha/horizon/d	Formula	$y = a \cdot x^{(1/b)}$
Value	0.0027	Parameter: a	90
		Parameter: b	1

OK Horizon 1 - + Finish Cancel

b)

Plant Inputs

Set 1

1. Water flux [cm ³ /cm ² /sec]	0.00000141	C. Chinense
2. Average root radius [cm]	0.02	
3. Root Length Density [cm/cm ³]	0.4	
4. I _{max} [umol/cm ² /sec]	0.00047	
5. K _m [umol/cm ³]	1.14	
6. C _{min} [umol/cm ³]	0	

OK Horizon 1 - + Finish Cancel

Figura 4.4. Parámetros utilizados en el modelo SSAND. a) Introducción de los datos de capacidad de suministro del suelo y b) introducción de los datos de la raíz y de la cinética de absorción.

Fertilizer Inputs

Set 1

Horizon 1 ◀ ▶ Event 1 - +

Time [day] 0 Add

Fertilization Unit kg/ha Remove

Amount 0

OK Cancel

Figura 4.5. Aplicación para la introducción de los eventos de fertilización.

El incremento de la demanda nutrimental a partir de los 50 días se asoció con la etapa de fructificación y cosecha, en donde al aumentar la producción de biomasa aumenta la demanda nutrimental. Estudios realizados en pimiento grueso (*Capsicum annuum* L.) (Rincón *et al.*, 1995) y jalapeño (*Capsicum annuum* L.) (Johnson *et al.*, 1996) han reportado que las etapas de mayor consumo de K son las de fructificación y cosecha. Al respecto, Marcussi *et al.*, (2004) señalan que la mayor producción de biomasa y

demanda de K en chile dulce (*Capsicum annuum* L.) ocurre a los 60 días después del trasplante, acumulándose éste principalmente en frutos. De acuerdo al modelo SSAND la demanda de K de chile habanero para alcanzar las metas de producción (28 t ha⁻¹ de fruto fresco) fue de 78 kg ha⁻¹. Valores similares para este mismo cultivo fueron reportados por López (2003), al señalar una demanda de K de 76 kg ha⁻¹, cuando fue fertilizado con 200 kg ha⁻¹ de K; sin embargo, la producción de fruto en este caso fue de 21 t ha⁻¹.

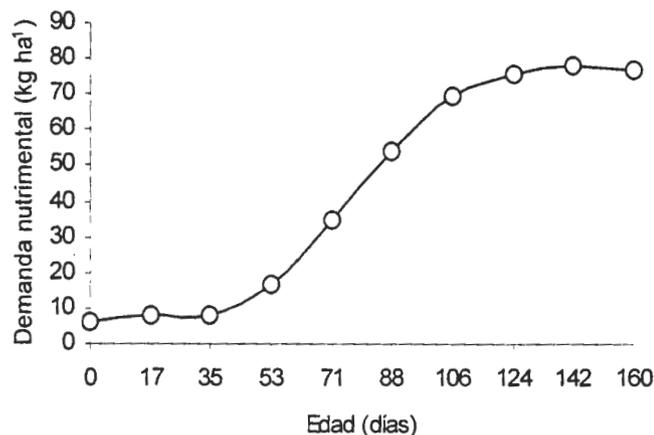


Figura 4.6. Demanda estimada de K por el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) mediante el modelo de simulación SSAND, para una producción de 28 t ha⁻¹ de fruto fresco.

Potencial productivo de los suelos

La simulación del desarrollo de la planta de chile habanero en 15 suelos cuyo único aporte de K fue el nativo del suelo se muestra en la Figura 4.7. De acuerdo a los resultados del modelo, la máxima producción de biomasa de chile habanero cuando no se incorpora K podría ser de 62 kg ha⁻¹ a los 140 días de desarrollo en el suelo de Peto (Figura 4.7a), mientras que en el suelo de Cacalchen el desarrollo del cultivo sería prácticamente nulo (Figura 7d). El contenido de K reportado en estos suelos fue 36 µg mL⁻¹ y 0.8 µg mL⁻¹ respectivamente y aún con contenidos mayores de K, el potencial productivo se ve limitado. Estudios realizados en *Capsicum annuum* han reportado que los suelos con concentraciones menores 100 µg mL⁻¹ de K son pobres

para la producción de este cultivo y las necesidades de fertilización son muy importantes, y solamente si se mantuviera una concentración arriba de $200 \mu\text{g mL}^{-1}$ de K, no habría necesidad de fertilización Burgueño *et al.*, (1994). Esto explica que la simulación del modelo SSAND muestre que la producción de biomasa de chile habanero sea limitada y en consecuencia la producción de fruto sería prácticamente nula en los suelos de Yucatán.

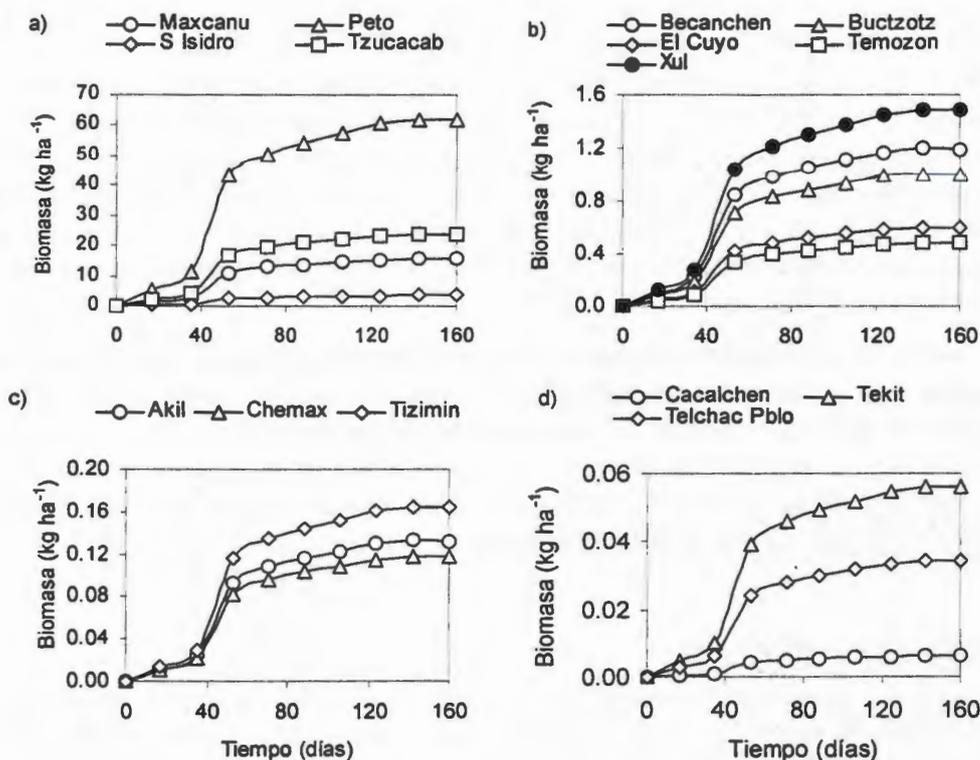


Figura 4.7. Simulación de la producción de biomasa del cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en suelos sin fertilización potásica. En orden descendente con base a la producción de biomasa: a) suelos de Peto, Tzucacab, Maxcanu, S. Isidro, y; b) Xul, Becanchen, Buctzotz, El Cuyo y Temozon; c) Tizimin, Akil, Chemax; d) Tekit, Telchac Pueblo y Cacalchen.

De acuerdo al modelo, suelos con altos contenidos de K soluble no necesariamente manifestaron una alta producción de biomasa; tal es el caso del suelo de Peto con $36 \mu\text{g mL}^{-1}$ y una producción de biomasa de 62 kg ha^{-1} , mientras que Tzucacab con $91.7 \mu\text{g mL}^{-1}$ de K muestra una producción de biomasa de 24 kg ha^{-1} (Figura 4.7a). Esto se debe a los diferentes factores que afectan la eficiencia de la nutrición de las plantas. Sauerbeck & Helal (1990), mencionan que los parámetros del suelo relacionados con la absorción de nutrientes son, además de su concentración en la solución, el poder amortiguador del suelo, esto es, la asociación del nutriente entre la fase sólida y líquida del suelo, así como el coeficiente efectivo de difusión. La difusión de K en los suelos de Peto y Tzucacab fue 2.3×10^{-7} y $8.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ respectivamente, esto significa que el K se desplaza dos veces más rápido en el suelo de Tzucacab (Capítulo 1) y es probable que se pierda por lixiviación antes de alcanzar la superficie de la raíz. Los valores del poder amortiguador de K, presentados en el Capítulo 1, muestran que aún con menor contenido de K soluble en el suelo de Peto, su alto poder amortiguador ($b' = 126$) indica que el K tiende a permanecer retenido a los coloides del suelo evitando que éste se pierda por lixiviación y por tanto sea mejor aprovechado por la planta.

Las metas de producción propuestas para chile habanero son de 9621 kg ha^{-1} de biomasa seca en las que se incluye un rendimiento de fruto fresco de 28 t ha^{-1} y aún cuando las semillas contienen cantidades apreciables de nutrientes minerales, la absorción de éstos, comienza poco después de la germinación, por lo que la incorporación de K se hace necesaria en estos suelos, ya que ninguno de ellos podrían cubrir los requerimientos de la planta.

Requerimientos de potasio

Las dosis de fertilización propuestas para cubrir la demanda de K por el cultivo de chile habanero, mostraron que la cantidad de K por aplicar a los suelos está en un rango de 108 a 150 kg ha^{-1} (Cuadros 4.4 y 4.5). Los resultados de la absorción de K para cada propuesta de fertilización, fueron similares a la demanda del nutriente durante el ciclo de cultivo en la mayoría de los suelos. Los suelos donde la absorción de K no resultó igual a la demanda nutricional fueron: Akil, Cacalchen, Chemax, Tekit, Telchac Pueblo, y Temozon. No obstante, estos suelos son los que requirieron la mayor fertilización potásica (entre 140 y 150 kg ha^{-1}). Por el contrario, aquellos suelos en donde la absorción de K por las raíces cubrió la demanda del cultivo, los

requerimientos de K estuvieron entre 108 y 126 kg ha⁻¹, siendo estos los suelos de Becanchen, Buctzotz, El Cuyo, Maxcanu, Peto, San Isidro, Tizimin, Tzucacab y Xul

La Figura 4.8, muestra el ejemplo de dos suelos contrastantes; en uno, el régimen de fertilización propuesto lleva a igualar la demanda y la absorción de K (Peto) y en otro, la absorción y la demanda no se igualan (Cacalchen), aún cuando la dosis total de K por aplicar fue mayor en Chemax. Es posible que los suelos en donde la absorción por el cultivo no cubre la demanda nutrimental de la planta se deba a que parte del K incorporado sea retenido por ciertos coloides del suelo y su disponibilidad para la planta sea lenta. Según Bertsch & Thomas (1985), algunos suelos pueden presentar agotamiento del K que forma parte de ciertos minerales, y al incorporarse K con la fertilización, éste reemplaza al K agotado en los minerales, fijándolo, sin que éste sea aprovechado por la planta. En estos casos el K aplicado primero cubre los requerimientos del suelo y después los de la planta. Puede ocurrir también, que el K incorporado quede atrapado convirtiéndolo en K no disponible para los cultivos. Estudios realizados por Øgaard & Krogstad (2005), señalaron que las carencias de K en la producción de pasto, en suelos fertilizados con 180 kg ha⁻¹ de K, se debieron a que cationes como Ca y Mg al hidratarse pueden expandir las láminas de las arcillas ocurriendo intercambio de éstos con el K, y al colapsarse las láminas atrapan K, provocando el agotamiento irreversible de K.

Es probable que los suelos de Telchac Pueblo, Cacalchen, Tekit, Akil, Chemax y Temozon, presenten agotamiento de K y requieran de una fertilización previa al establecimiento del cultivo, de tal modo que el K esté disponible posteriormente en las etapas de fructificación y producción de fruto. Por otra parte, en los suelos de Becanchen, Buctzotz, El Cuyo, Maxcanu, Peto, San Isidro, Tizimin, Tzucacab y Xul, según los resultados de la simulación, el K aplicado con la fertilización es aprovechado por la planta de acuerdo a cada una de sus etapas fenológicas.

Momento oportuno de incorporación de K

No obstante la importancia de la incorporación oportuna de los nutrimentos, pocos trabajos mencionan el momento ideal para la incorporación de K. Tun (2001), recomienda para chile habanero, una dosis de fertilización potásica de 120 kg ha⁻¹ y para su aplicación, señala, que ésta debe ser 60 kg antes del trasplante y 60 kg al inicio de la floración, esto quiere decir que el 50% de la fertilización potásica debe incorporarse antes del establecimiento del cultivo en el campo.

Cuadro 4.4. Frecuencia y dosis sugeridas en kg ha⁻¹ de incorporación de K en suelos superficiales (< 25 cm) de Yucatán para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.).

DDT [†]	EC [‡]	Akil	Cacalchen	Chemax	Tekit	Telchac Pueblo	Temozon
1		10	12	0	10	5	10
5		0	12	5	10	10	2
10	I	0	10	5	10	5	12
15		0	10	5	10	10	2
20		0	10	10	10	5	12
30		0	10	10	10	20	10
40	II	25	10	10	30	5	0
50		35	10	10	35	25	10
55		0	0	0	0	10	0
60		0	20	20	0	0	20
70	III	0	0	0	0	0	0
75		30	25	30	15	20	25
80		0	0	0	0	0	0
85		0	0	0	0	0	0
90		0	0	0	0	0	0
95		0	0	0	0	0	0
100		25	10	20	0	15	20
110		0	0	0	0	0	0
120	IV	10	0	10	0	5	10
130		0	0	0	0	0	0
140		5	2	5	0	5	8
150		5	0	5	0	0	0
160		5	0	5	0	0	0
Total		150	141	150	140	140	141

[†]Días después del trasplante

[‡]Etapas del cultivo: I Adaptación después del trasplante, II Crecimiento, III Desarrollo de fruto y maduración, IV Cosecha.

Cuadro 4.5. Frecuencia y dosis sugeridas en kg ha⁻¹ de incorporación de K en suelos profundos (> 35 cm) de Yucatán para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.).

DDT [†]	EC [‡]	Becanchen	Buctzotz	El Cuyo	Maxcanu	Peto	San Isidro	Tizimin	Tzucacab	Xul
1		5	10	5	5	5	5	10	5	5
5		0	0	3	0	0	2	8	0	0
10	I	5	0	3	4	0	2	8	5	0
15		0	0	5	0	3	2	8	0	8
20		0	0	0	4	0	2	8	0	0
30		5	0	0	0	3	2	8	2	2
40	II	2	8	3	6	5	2	16	0	2
50		6	8	5	8	5	5	18	10	5
55		0	0	3	0	0	0	0	0	0
60		22	8	18	20	18	10	0	11	13
70	III	0	15	18	0	0	15	0	13	16
75		30	10	6	20	18	0	6	0	0
80		0	10	0	0	0	20	0	20	18

Cuadro 4.5. (Continuación)

85		0	10	6	12	20	0	0	0	0
90		0	12	0	0	0	18	12	18	13
95		0	0	9	0	0	0	0	0	0
100		21	12	8	23	25	12	10	12	11
110		0	0	6	0	10	8	6	7	7
120	IV	10	12	5	13	3	5	4	5	6
130		0	0	0	0	3	0	4	3	4
140		7	8	5	9	2	3	0	2	2
150		0	0	0	0	2	0	0	0	0
160		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		113	123	108	124	122	113	126	113	112

†Días después del trasplante

‡Etapas del cultivo: I Adaptación después del trasplante, II Crecimiento, III Desarrollo de fruto y maduración, IV Cosecha

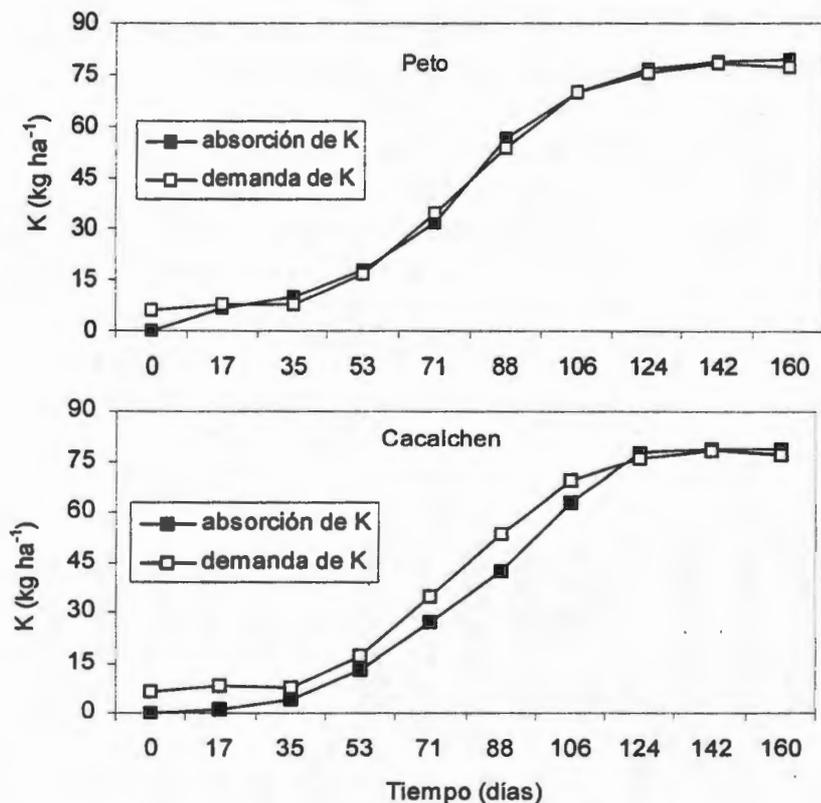


Figura 4.8. Simulación de la demanda nutrimental (DN) y absorción de K en dos suelos con diferente regímenes de fertilización potásica.

Por su parte, Soria *et al.*, (2002), para este mismo cultivo, recomienda aplicar 150 kg ha⁻¹ de K, de los cuales 100 kg (el 75%) deben incorporarse en las etapas de fructificación y cosecha. Ambas recomendaciones son adecuadas si para ello se consideraron las características del suelo como la movilidad del K en solución (difusión y flujo masivo) y las características de la cinética de absorción de la planta (velocidad máxima de absorción y la constante de Michaelis Menten). De acuerdo a Comerford (1999), en la nutrición de cultivos, el estatus del sistema suelo-planta deben considerarse: i) la liberación de los nutrientes de la fase sólida del suelo a la fase líquida, ii) el movimiento de los nutrientes a través de la solución del suelo hacia

las raíces de las plantas, y iii) la absorción por las raíces. Cuando son considerados estos tres factores se tiene un mejor aprovechamiento de nutrimentos por los cultivos.

Los resultados en este estudio mostraron que cuatro de los quince suelos evaluados, requieren entre el 60 y 89% de la fertilización total durante las etapas de adaptación y crecimiento, siendo estos suelos: Cacalchen, Tekit, Telchac Pueblo y Tizimin. Además de éstos, los suelos de Akil, Chemax y Temozon, requieren que más de la tercera parte de K se incorpore antes de la fructificación (Figura 4.9). Esto indica que no en todos los suelos se recomienda la mayor aplicación de K en las etapas de mayor consumo (fructificación y cosecha) como se ha sugerido para diferentes cultivos (Rincón *et al.*, 1995; Johnson *et al.*, 1996; Burgarin *et al.*, 2002a; Burgarin *et al.*, 2002b).

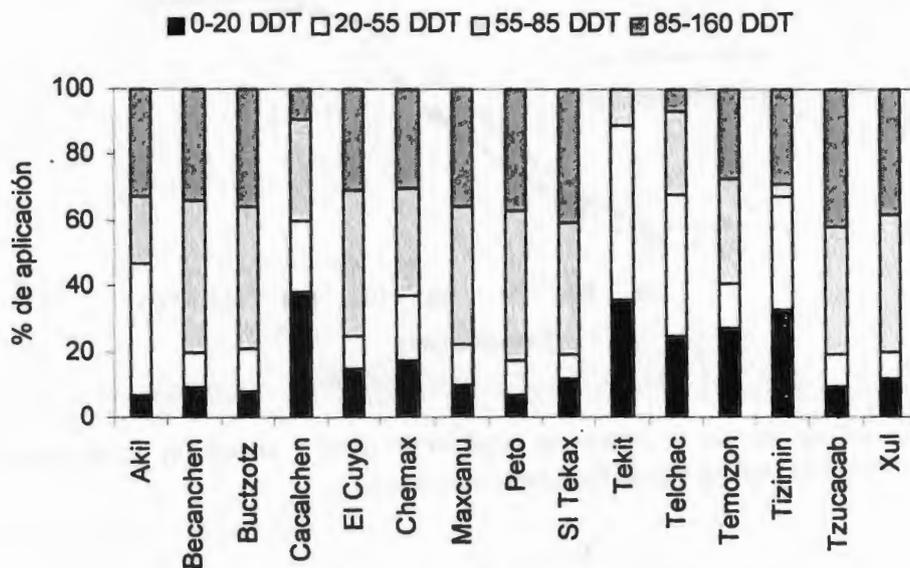


Figura 4.9. Porcentaje de incorporación de fertilizante potásico en diferentes etapas del cultivo para cubrir la demanda de K de acuerdo a la simulación de la toma del nutrimento. (0-20 DDT adaptación, 20-55 DDT desarrollo, 55-85 DDT fructificación, 85-160 DDT producción).

Es probable que en los suelos de Cacalchen, Tekit, Telchac Pueblo, Tizimin, Akil, Chemax y Temozon, una fertilización previa al establecimiento del cultivo sea adecuada como señala Tun (2001), pero en Akil, Chemax, Temozon y Tizimin la fertilización debe continuar a lo largo de todo el ciclo del cultivo ya que, el 33, 30, 27 y 29 % de la fertilización respectivamente, se requiere durante la cosecha.

Por otra parte, durante la maduración y cosecha de fruto, los suelos de Becanchen, Peto, San Isidro, Tzucacab, y Xul requirieron el 80% de la fertilización de K y los suelos de El Cuyo, Buctzotz, y Maxcanu el 78, 79 y 78% respectivamente, similar a lo señalado por Soria *et al.* (2002) al proponer que el 75% de la fertilización debe ser aplicado durante estas mismas etapas del cultivo. Sin embargo, de acuerdo al modelo de simulación, en los suelos de Buctzotz, Maxcanu, Peto, San Isidro y Tzucacab un porcentaje entre el 41 y 53% de K, debe ser incorporado específicamente durante la cosecha de fruto el cual inicia alrededor de los 85 días después del trasplante. La Figura 4.10 muestra la fertilización acumulada y mientras para unos suelos la fertilización debiera realizarse hasta finalizar el ciclo del cultivo a los 160 días, (Akil y Chemax), la mayoría requiere que el K sea dosificado hasta los 140 días del ciclo, siendo un caso particular el suelo de Tekit, en donde la incorporación de K fue suficiente hasta los 75, días ya que el 36, 54 y 11 % de la fertilización debe aplicarse en las etapas I, II y III respectivamente.

Relación de los requerimientos de K y regiones geográficas

La Figura 4.11 muestra la distribución geográfica de los suelos en el estado y los requerimientos de fertilización potásica para la producción de chile habanero según los resultados del modelo de simulación SSAND. De acuerdo a la capacidad de suministro de K por el suelo y a las características de la cinética de absorción por las raíces de chile habanero, los suelos que mostraron requerir las dosis más altas de K (de 140 a 150 kg ha⁻¹), fueron los suelos con profundidad menor de 25 cm (Telchac Pueblo, Cacalchen, Tekit, Akil, Temozon y Chemax) (capítulo 3). Según Duch (1988), estos suelos se ubican en las zonas edáficas de Leptosoles, Rendzinas, Cambisoles y Luvisoles someros DETENAL (1974).

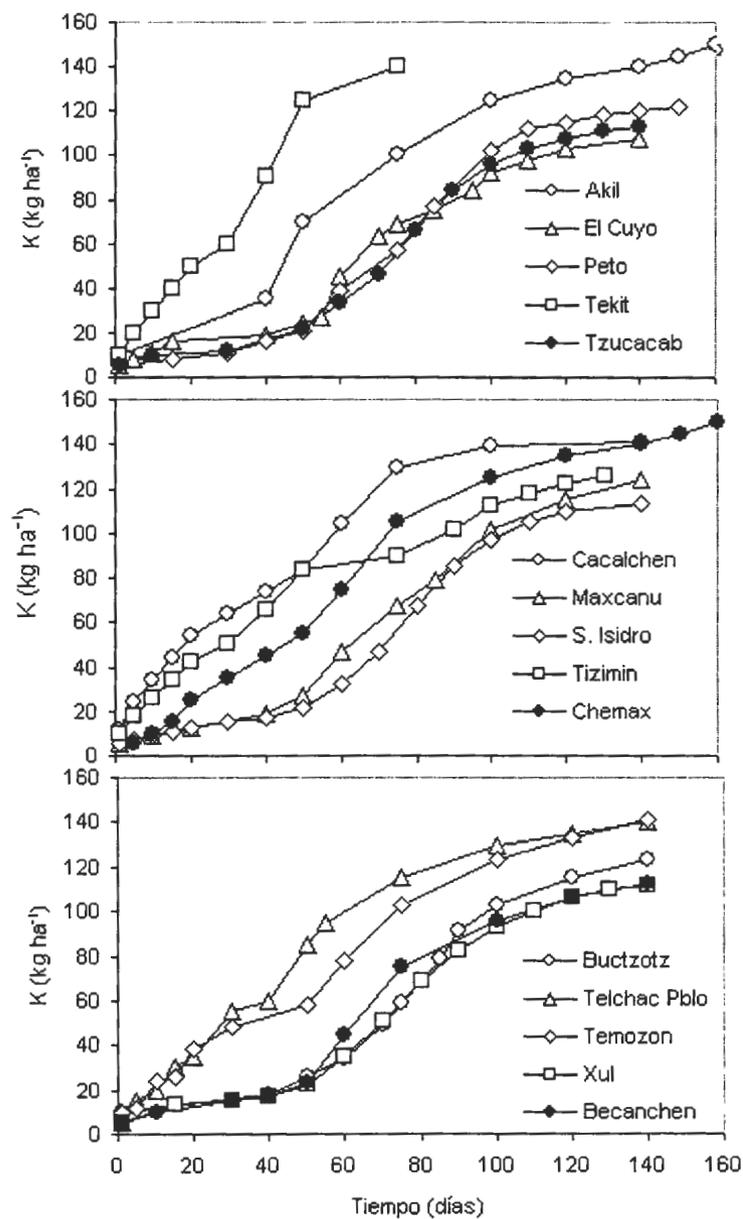


Figura 4.10. Fertilización acumulada de K requerida para cubrir la demanda nutricional del cultivo de chile habanero.

La caracterización realizada de estos suelos (Capítulo 2) indican que pertenecen a la clase de Rendzinas, excepto Telchac pueblo y Akil, clasificados como Leptosol y Cambisol crómico respectivamente. Soria et al. (2002), atribuyen que la ausencia de respuesta a la fertilización química en suelos delgados se debe a la permeabilidad la cual favorece que los nutrimentos se pierdan por lixiviación. Sin embargo, el coeficiente de difusión efectiva (D_e) de K en los suelos de Telchac Pueblo, Cacalchen, Tekit y Akil fueron los más bajos por lo que el desplazamiento de K reportado para estos suelos fue de 0.1 a 0.16 cm día⁻¹ y de 0.28 y 0.40 cm día⁻¹ para Chemax y Temozon respectivamente.

Es posible, que el lento desplazamiento de K en estos suelos se deba a su alta proporción de materia orgánica y con ello su elevada retención de humedad; por lo tanto, el desplazamiento de los iones K fue lento en los escasos centímetros de suelo. No obstante, pero una vez que recorren los 25 cm de profundidad del suelo, los iones en solución se lixivian con facilidad entre las rocas del subsuelo. Por su ubicación geográfica, estos suelos se sitúan en la región central y oriente del estado, y son considerados suelos jóvenes en comparación con los suelos del sur de mayor edad geológica (Duch, 1991). Esto explica que los suelos de la región central reportaran el menor contenido de K soluble (0.023 - 0.069 mM), seguido por los suelos del oriente con 0.07 y 0.19 mM de K, excepto Temozon con 0.59 mM de K.

Los suelos con profundidad igual de 30 cm o mayor requirieron menores dosis de fertilización potásica. De acuerdo al modelo de simulación la dosis sugerida para estos suelos fue de 108 a 126 kg ha⁻¹ y están situados principalmente al sur del estado: Xul, San Isidro, Peto, Tzucacab y Becanchen, al poniente: Maxcanu y en la región noreste Buctzotz, Tizimin y El Cuyo. El desplazamiento de K en estos suelos fue más rápido (entre 0.32 y 0.55 cm día⁻¹) Sin embargo, la incorporación oportuna del fertilizante podría evitar las pérdidas por lixiviación y de acuerdo a los resultados de la simulación del 78 al 83% de la fertilización debe incorporarse en la maduración y cosecha de fruto. Por lo tanto, la incorporación de K antes del trasplante y al inicio de la floración como ha sido sugerido por Tun (2001) no es recomendada para estos suelos, ya que es probable que se pierda por lixiviación antes de ser utilizado en las etapas de mayor consumo.

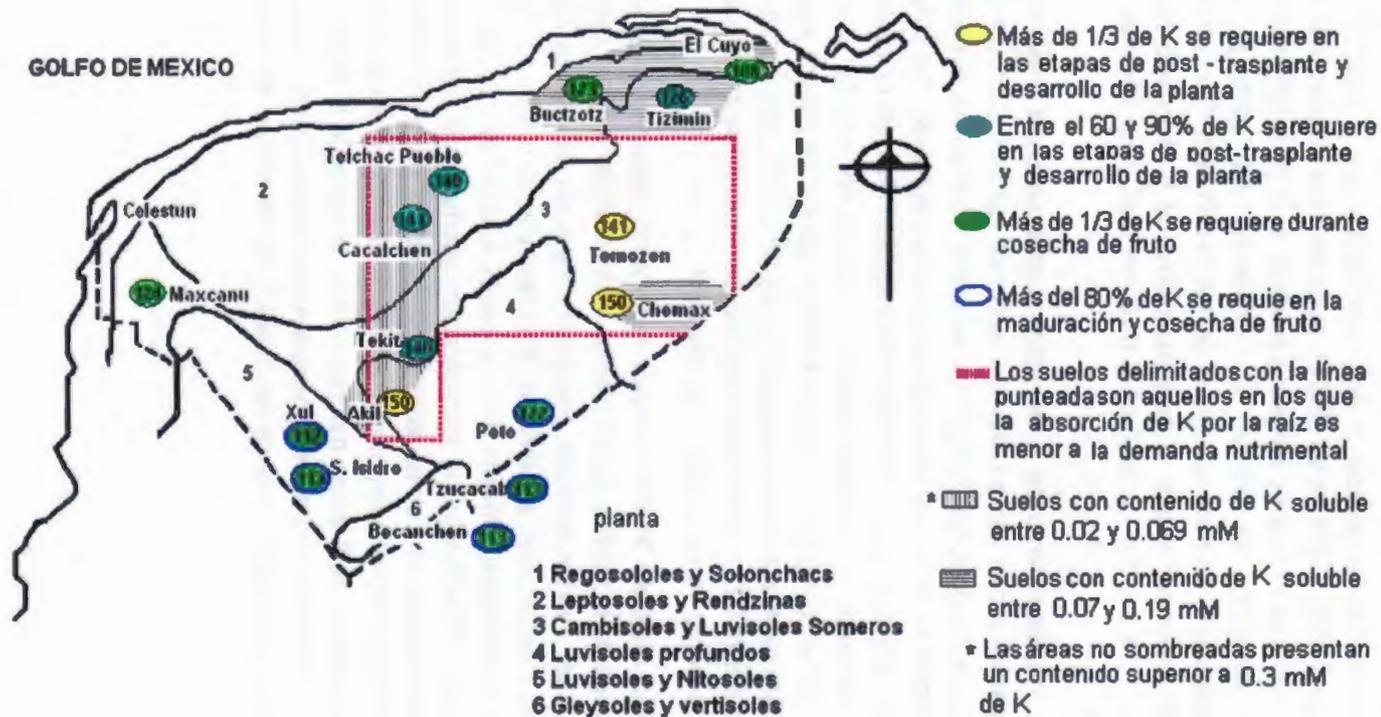


Figura 4.11. Distribución regional de los requerimientos de K para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en Yucatán. El modelo SSAND fue generado aplicando una simulación con el suministro del suelo y la demanda nutricional. Los valores dentro de los círculos son las dosis de K en kg ha^{-1}

CONCLUSIONES

La simulación de la toma de K para cubrir la demanda por el cultivo de chile habanero muestra que los requerimientos son entre 108 y 150 kg ha⁻¹ y que la dosificación varía para cada tipo de suelo.

Todos los suelos mostraron baja capacidad de suministro de K y sin un régimen de fertilización apropiado el potencial de producción de biomasa (incluyendo fruto) sería limitado.

De acuerdo a la simulación, el mejor aprovechamiento de K se obtuvo cuando en los suelos de Akil, Cacalchen, Chemax, Tekit, Telchac Pueblo, Tizimin, y Temozon, se incorporaron más del 30% de la fertilización en las etapas de adaptación y desarrollo de la planta y cuando más del 75 % de ésta se incorporó en las etapas de fructificación y cosecha en los suelos de Becanchen, Buctzotz, El Cuyo, Maxcanu, Peto, San Isidro, Tzucacab y Xul.

Un régimen de fertilización entre 140 – 150 kg ha⁻¹ de K fue requerido en los suelos superficiales (menores de 30 cm) y de 108 – 126 kg ha⁻¹ de K en los suelos profundos para que la absorción de K por las raíces cubriera la demanda nutrimental de la planta de chile habanero.

Es probable que seis de los suelos evaluados (Akil, Cacalchen, Chemax, Tekit, Telchac Pueblo y Temozon) presenten agotamiento de potasio. Esta apreciación se basa en el hecho de que aún cuando la fertilización potásica se incorporó al inicio del ciclo del cultivo, no se llegó a cubrir la demanda nutricional de la planta. De ser así, se sugiere la incorporación de K antes del establecimiento del cultivo.

REFERENCIAS

- Ayala S., Soria M., y Borges L. 1998. Respuesta del chile habanero (*Capsicum chinense*) a la aplicación de diferentes niveles de NPK en fertirrigación. Resumen *En: IX Congreso de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario*. Yucatán, México. p. 141.
- Barber S. A. 1984. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley & Sons. New York. 398 p.
- Bertsch P. M., and Thomas G. W. 1985. Potassium status of temperate region soils. *In: Potassium in Agriculture*. R. D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp. 131-162.
- Borges, G. L., y Noh J. A. 2001. Nutrición mineral y fertilización. *En: Memorias del Seminario de chile habanero*. Fundación Yucatán Produce A.C., SAGARPA, INIFAP. Yucatán, México. pp. 43-51.
- Bowen W., y Jeramillo R. 1977. Modelos de dinámica de nutrientes en el suelo y en la planta. VII Congreso Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. p. 1-8
- Buragrín M. R., Galvis-Spinola A., Sánchez-García P., y García-Paredes D. 2002a. Acumulación de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total de tomate. *Terra* 20: 401-409.
- Buragrín M. R., Galvis-Spinola A., Sánchez-García P. y García-Paredes D. 2002b. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra* 20: 391-399.
- Burgueño, H., Uribe F., y Valenzuela M. 1994. La fertirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Extracción de nutrientes por los cultivos de Tomate y Bell pepper en el valle de Culiacán, Sin. Los análisis de savia. 3ed. Bursag. México. 46 p.
- Claassen N., and Barber S. A. 1974. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. *Plant Physiol*. 54: 564-568.
- 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. *En: Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. Orellana R., Escamilla A., y Larqué A. (eds.). Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán. México. pp. 127-135.

Duch G. J. 1988. La conformación territorial del estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México. 427 p.

Duch G. J. 1991. Fisiografía del estado de Yucatán. Su relación con la agricultura. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México. 228 p.

DETENAL. Dirección de Estadística del Territorio Nacional. 1974. Sistema de Clasificación de suelos FAO/UNESCO. SPP. México D.F.

Johnson C., and Decoteau D. R. 1996. Nitrogen and potassium fertility affects jalapeño pepper plant growth, pod yield, and pungency. Hort Science 31(7): 1119 - 1123

Le Bot J., Adamowics S., and Robin P. 1998. Modeling plant nutrition of horticultural crops: a review. Scientia Horticulturae. 74: 47-82.

Li H., and Comerford N. B. 2000. SSAND Version 1.0, Release1.06 (10-8-2001) User's guide. University of Florida IFAS. 23 p.

Lopez L. R. 2003. Disponibilidad de N, P y K en cinco sustratos para la producción de *Capsicum chinense* Jacq. Tesis de Maestría. Subdirección de Investigación y Graduados Agropecuarios. Instituto Tecnológico Agropecuario No.2. Conkal, Yuc. México. 111 p.

Marcussi F. F. N., Lyra R. V. B., Grava de Godoy L. J., y Goto R. 2004. Macronutrient accumulation and partitioning in fertigated sweet pepper plants. Scientia Agricola. Sci. Agric. Piracicaba, Braz. 6(1): 62-68.

Mazum D. U. 1995. Evaluación de siete sustratos para la producción de plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense*) en contenedores de poliestireno. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico agropecuario No.2 Conkal, Yucatán. México. 62 p.

Øgaard A. F., and Krogstad T. 2005. Release on interlayer potassium in Norwegian grassland soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168: 80-88.

Rincón L., Saez J., Balsalobre E., y Pellicer C. 1995. Crecimiento y absorción de nutrientes del pimiento grueso en cultivo bajo invernadero. Invest. Agr. Prod. Veg. 10(1): 47-59

Sauerbeck D. R., and Helal H. M. 1990. Factors affecting nutrient efficiency of plants. In: Genetic aspects of plant mineral nutrition, 11-17. El Bassam N. (ed). Kluwer Academic Publisher. USA

- Soria M., Tun J., Trejo A., y Terán R. 2002. Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). SEP. DGTA. ITA-2 Conkal, Yuc, México. 75 p.
- Tinker P. B., and Nye P. H. 2000. Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press. USA. 444 p.
- Tun D. C. 2001. Características y Tecnología de Producción del chile habanero. SAGARPA. INIFAP-PRODUCE. Mérida Yuc. México. 74 p.
- Van Rees K. C. J., Comerford N. B., and Rao P. S. C. 1990. Defining soil buffer power: implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling. Soil Sci Am.J. 54: 1505-1507.
- Volke V., Etchevers J. D., Ramírez A. S., y Silva T. S. 1998. Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de Fertilización para cultivos. Terra 16 (1): 79-91.

DISCUSIÓN GENERAL

El análisis tradicional del diagnóstico de la fertilidad de suelos mide el contenido de K intercambiable y siguiendo este mismo criterio de medición todos los suelos de Yucatán son ricos en K. Los resultados del capítulo 2 muestran contenidos entre 0.8 y 3 cmol kg^{-1} de K intercambiable ya que superan los 0.6 cmol kg^{-1} que definen los suelos ricos en K. Por otro lado, el K en la solución del suelo, cuando estos fueron llevados a capacidad de campo, se encontró en un rango entre 0.02 y 2.35 mM. Es por ello que la relación entre K intercambiable y soluble fue baja ($r^2 = 0.6$) y no necesariamente los suelos con alto contenido de K intercambiable tuvieron un alto contenido de K soluble.

Los valores de K intercambiable son referidos para definir la fertilidad del suelo, debido a que ésta forma de K es retenida a los coloides del suelo y las pérdidas por lixiviación son mínimas. Por lo tanto representa el K potencialmente disponible para las plantas. Sin embargo, el K inmediatamente disponible para la planta es aquel que está disuelto como ión (K^+) en la solución del suelo. Las plantas en crecimiento rápidamente extraen el K de la solución del suelo, pero a medida que el K es absorbido su concentración es renovada por el K intercambiable. El proceso de adsorción y desorción es el que repone y equilibra la concentración de K en la solución del suelo y es diferente para cada tipo de suelo, aún cuando se tuviera contenidos similares de K intercambiable. Es por ello, que las recomendaciones de fertilización basadas en el simple análisis de K intercambiable, no siempre cubren las necesidades de las plantas. Esto se ha observado cuando una recomendación de fertilización tiene respuestas diferentes en la producción de los cultivos, aún cuando un análisis previo del contenido de K intercambiable reportara valores similares.

Entre los parámetros utilizados para describir la capacidad de suministro de K del suelo se encuentra el coeficiente de partición (K_d), el cual se refiere a la distribución de K entre la fase sólida y líquida del suelo. Los valores de K_d estuvieron en un rango de 20 a 148 (Capítulo 3) y aún cuando el contenido de arcilla afecta directamente a K_d , no hubo relación significativa entre ambas. Esto puede deberse más al tipo de arcilla que al porcentaje presente, ya que la velocidad de reacción del K entre la fase sólida y líquida varía con el tipo de arcilla y la posición del ión en la misma. Cuanto más débilmente esté retenido el K en la superficie de las arcillas, más fácilmente puede ser liberado a la solución del suelo. Sin embargo, el K ubicado entre las láminas de arcilla depende de la capacidad de ensancharse y expandirse de las arcillas.

Los valores de K_d fueron utilizados para evaluar el poder amortiguador del suelo (b'), esto es, la capacidad amortiguadora del suelo para mantener una concentración en la solución cuando se adiciona K al suelo, o cuando se lixivia o es tomado por la planta. Dado que b' se obtiene a partir de K_d , el tipo de arcilla afecta igualmente el poder amortiguador del suelo. Debido al alto contenido de carbonatos y de materia orgánica la evaluación del tipo de arcilla en los suelos de Yucatán se dificulta, por lo que existen pocos reportes que mencionen el tipo arcilla predominante. Sin embargo, se ha reportado la presencia de arcillas tanto de intercambio rápido como la caolinita y montmorillonita, como de liberación muy lenta como la vermiculita y la illita. Otras arcillas reportadas son la halloisita, bohemita, hematita, illita y cuarzo. Es evidente que la evaluación del tipo de arcilla presente y la proporción de ésta son necesarias para explicar las diferencias entre los suelos de K_d y b' . Sin embargo, los valores altos de ambos parámetros, sugieren que el equilibrio entre el K adsorbido a los minerales del suelo y el K en la solución, tiende más al K adsorbido a los minerales. Por lo tanto, se espera que una parte importante del K incorporado en la fertilización quede retenido en los coloides del suelo.

Los valores de K_d , y b' fueron utilizados para estimar el coeficiente efectivo de difusión de K (D_e) en el suelo. Este parámetro es el que mejor describe la capacidad de suministro de K para las plantas debido a que la difusión es el principal proceso por el cual el K es llevado hacia la raíz. Además de K_d y b' , se utilizaron los datos de la densidad aparente del suelo (ρ), el contenido volumétrico de agua (θ) y el factor de impedancia (f), refiriéndose éste, al camino tortuoso que debe seguir el ión hasta alcanzar la superficie de la raíz. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los suelos ($p < 0.0001$) y los valores encontrados estuvieron entre 9.9×10^{-8} y $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ en los suelos de Akil y Becanchen respectivamente, lo que quiere decir que la difusión en Becanchen fue 15 veces mayor que en Akil.

Es obvio que para que ocurra la difusión debe haber K en la solución del suelo y el contenido de agua no debe ser mayor de la capacidad de campo para evitar las pérdidas por lixiviación, pero suficiente para que el K no tenga que transportarse solamente a través de la fina película de humedad que cubre las partículas del suelo, incrementando con ello el tiempo de transporte. El contenido de humedad en los suelos utilizados en este estudio fue el obtenido cuando éstos se llevaron a capacidad de campo. Por lo tanto, el desplazamiento de K en estos suelos puede ser diferente si no se tiene un suministro adecuado de agua.

En términos generales los suelos de Yucatán con mayor contenido de K intercambiable fueron los más profundos, excepto el suelo de Celestun cuya

profundidad de escasos 2 cm presentó un alto contenido que puede atribuirse a su elevado porcentaje de materia orgánica (16.1%) y su alta capacidad de retención de iones. Del mismo modo, el K soluble se encontró en mayor proporción en los suelos profundos.

Los bajos contenidos de K intercambiable y soluble en los suelos más superficiales pueden deberse a diferentes factores: i) la escasa capa superficial de suelo (entre 2 y 20 cm), puede estar constituida principalmente de sustrato orgánico formado de residuos de maleza o cualquier cultivo que se establezca en estos suelos. Siendo el K de origen inorgánico, su contenido en estos suelos se ve limitado a la reducida presencia de minerales arcillosos, ii) es posible que los minerales predominantes en la capa superficial presenten mayor afinidad a otros cationes (Ca por ejemplo), y en consecuencia el K sea fácilmente lixiviado a capas más profundas. Con algunas excepciones, los resultados muestran que los suelos superficiales son efectivamente los de mayor porcentaje de materia orgánica, mayor contenido de Ca, los que presentan mayor pedregosidad en la superficie del suelo y además, la presencia de rocas en el subsuelo se encuentra a escasos 20 o 25 cm de profundidad, facilitando el rápido drenaje del agua y iones disueltos. Es por esto que las recomendaciones de fertilización obtenidas con el modelo de simulación SSAND (capítulo 5), reportaron que estos suelos son los que requieren una mayor dosis de K para la producción de chile habanero.

En la evaluación de la cinética de absorción de K por las raíces de chile habanero (Capítulo 4) se observó que la velocidad máxima de absorción de K (I_{max}) no difiere significativamente cuando se tienen concentraciones diferentes en la solución externa. No obstante, la constante de Michaelis-Menten (K_m) fue diferente para cada concentración de K, lo cual indica que diferentes número de transportadores interviene en la absorción de K por las raíces. El ajuste por mínimos cuadrados de la absorción de K por las raíces puestas en soluciones de 0 a 8 mM reportó una velocidad máxima de absorción igual a $4.7 \times 10^{-4} \mu\text{M cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y un valor de la constante de Michelis-Menten igual a 1.15 mM. Debido al rango de concentración evaluada la toma de K se realizó por un mecanismo de alta afinidad (Sistema II). Esto significa que el proceso de absorción de K en chile habanero es mediado por un transporte pasivo de canales selectivos de K, sin embargo es posible que en la absorción intervengan acarreadores, ya que ambos canales y transportadores contribuyen a la toma de K en las células vegetales y no está claro que los dos sistemas de transporte sean diferentes con relación a la afinidad.

La concentración de K en la solución de los 16 suelos a capacidad de campo fue variable, la mayoría de los suelos estuvieron entre 0.02 y 0.9 mM de K y solamente un suelo reportó 2.35 mM (Capítulo 2), esto significa que con excepción de este suelo, la planta no tomó K a la velocidad máxima de absorción, e incluso, es posible que debido a las bajas concentraciones de K en la solución del suelo ocurra el fenómeno de exflujo o liberación de K de la raíz a la solución externa. De acuerdo a los resultados obtenidos en el Capítulo 3, el exflujo se presentó cuando la concentración de la solución externa fue 0.089 mM, lo que quiere decir que por su contenido de K soluble, en cinco suelos es posible el exflujo de K, siendo estos: Akil, Buctzotz, Cacalchen, Tekit y Telchac Pueblo.

Cuando la capacidad de suministro de K de los suelos, así como la cinética de absorción de K por las raíces de chile habanero fueron analizados en el modelo SSAND, los resultados mostraron que los suelos por si solos no podrían cubrir la demanda nutricional del cultivo (Capítulo 4). La máxima producción de biomasa seca sería 62 kg ha⁻¹ en el suelo de Peto. No obstante, de acuerdo a los patrones de desarrollo establecidos para el cultivo, se podría esperar obtener 9621 kg ha⁻¹ de materia seca en la que se incluye un rendimiento de fruto fresco de hasta 28 t ha⁻¹. Los regímenes de fertilización potásica propuestos en el modelo para cubrir la demanda de la planta, mostraron que se requieren de 108 a 150 kg ha⁻¹ de potasio, para el desarrollo adecuado y el rendimiento de fruto deseado. La cantidad de K requerido para cada suelo dependió de sus características individuales. El suelo de Celestun fue omitido para ejecutar el modelo debido a su reducida profundidad por lo que se consideró no apto para el establecimiento de chile habanero.

Aún cuando las dosis de incorporación de K se enfocaron en el rango de fertilización propuestas por diferentes autores, es importante destacar que el tiempo oportuno de incorporación es fundamental para el aprovechamiento del nutriente, y pocos estudios hacen referencia a esto. La simulación de suministro y demanda de K mostró que los suelos de Cacalchen, Tekit, Telchac Pueblo y Tizimin, requieren que más del 60% de la fertilización se incorpore en las etapas adaptación y de desarrollo (antes de la fructificación). Además de éstos, los suelos de Akil, Chemax y Temozon requieren que más de la tercera parte de la fertilización total se aplique en estas mismas etapas. Necesidades más tardías de K fueron reportadas para los suelos de Becanchen, Peto, San Isidro, Tzucacab, El Cuyo, Buctzotz, Maxcanu y Xul ya que los requerimientos fueron del 80 ±2% durante la maduración y cosecha de fruto, inclusive, los suelos de Buctzotz, Maxcanu, Peto, San Isidro y Tzucacab un porcentaje entre el 41 y 53% de K

debe ser incorporado durante la cosecha de fruto específicamente que inicia alrededor de los 85 días después del trasplante.

Varios estudios han reportado que al iniciar la floración y fructificación, el consumo de K por los cultivos se incrementa. Del mismo modo, varios estudios han reportado la relación entre K y la calidad de las cosechas. Sin embargo, el suministro oportuno, no sólo depende de la etapa fenológica de la planta sino también de las características del suelo. Los resultados de la simulación mostraron para cada suelo distintos eventos de fertilización, lo cual puede ser atribuido a la presencia de diferentes tipos de minerales arcillosos. De este modo, es posible que en algunos suelos con vermiculita o micas con agotamiento de K, la aplicación de éste resulte en su fijación, ocasionando una reducción drástica del K aprovechable. Solamente después de ocupar los sitios vacantes de K en los minerales, el K adicionado podrá cubrir la demanda del cultivo. Esto puede ser aplicado a los suelos que requirieron un porcentaje alto de K en las primeras etapas del cultivo, de tal modo que, cuando inicie la floración y fructificación, el K se encuentre disponible para la planta.

Es posible también que ocurra un agotamiento irreversible de K. Esto sucede cuando las láminas de los minerales se colapsan atrapando internamente el K, en estos casos, se requerirán mayores dosis de K. Otros minerales que pueden estar presentes son la caolinita y la montmorillonita; el primero tiene mayor afinidad por los iones K, pero el segundo los retiene con mayor intensidad. Por lo tanto, el tipo de mineral predominante influye marcadamente en la disponibilidad del K para la planta. El alto contenido de carbonatos y de materia orgánica en los suelos de Yucatán ha dificultado el estudio de los minerales predominantes en estos suelos, pero sin duda, una diversidad de ellos se encuentra presente.

Generalmente los fertilizantes potásicos son muy solubles en agua, al ser incorporados al suelo el K se encuentra como K_2O , pero al reaccionar con el agua se generan concentraciones elevadas de K^+ en la zona del fertilizante. Los iones de K^+ pueden ser adsorbidos por el complejo de intercambio, quedar atrapados entre las láminas de ciertos minerales, difundirse hacia la zona radicular, donde son absorbidos o bien, perderse por percolación antes de llegar a la superficie de la raíz. De aquí, que las propiedades de suelo, como la capacidad de la fase sólida del suelo para mantener una concentración de iones en solución (b'), la distribución de iones entre la fase sólida y líquida de iones (K_d); el coeficiente efectivo de difusión (D_e) y la cinética de toma de iones por las raíces (I_{max} y K_m) sean algunos de los parámetros considerados en el modelo SSAND.

Los modelos de simulación han sido una herramienta útil para predecir el comportamiento de los cultivos en el campo. Predecir dicho comportamiento, ha sido uno de los principales retos en la agricultura. Generalmente, es necesario introducir simplificaciones a un problema agrícola para hacerlo matemáticamente más fácil de manejar. Algunas veces surgen objeciones acerca de que tales simplificaciones reducen la realidad del problema sin embargo, éste no es el caso, ya que el principal propósito es aislar las características esenciales de un problema y extraerla de los menos esenciales. Hasta el momento no se han documentado los factores de los suelos de Yucatán involucrados en la disponibilidad de K y las características de la cinética de absorción por las raíces de chile habanero. Este es el primer reporte sobre la predicción de la toma de K por raíces de esta solanácea e, independientemente de la complejidad de la aplicación del modelo de simulación, siempre es posible comparar los resultados simulados con datos medidos y determinar que tan correctamente el modelo imita la realidad, siendo esto un siguiente objetivo de estudio.

CONCLUSIONES GENERALES

El adecuado suministro de K a través de la fertilización, es necesario para obtener buenos rendimientos de fruto. Sin embargo, esta práctica por sí sola no es una garantía de cosechas abundantes, ya que existe una gran cantidad de factores que regulan el crecimiento y desarrollo de las plantas. La combinación de estos factores es determinante en el desarrollo y producción de las plantas.

Las deficiencias de K tienen consecuencias severas debido a que está involucrado en diversas funciones como: activación enzimática, procesos de transporte a través de membranas, neutralización aniónica y potencial osmótico. Por lo tanto, el suministro de K por el suelo debe cubrir la demanda por el cultivo, por lo que es importante evaluar los factores involucrados tanto del suelo como de la planta. La incorporación de K al suelo, cuando éste no cubre la demanda, debe realizarse de manera oportuna y en dosis adecuadas, de tal forma, que la fertilización se realice de manera eficiente.

Los resultados del estudio de los suelos evaluados y de la planta pueden ser relacionados a manera de conclusión con lo siguiente:

1. Los suelos evaluados son ricos en K intercambiable, pero pobres en K soluble que es la forma inmediatamente disponible para las plantas.
2. El contenido de K intercambiable y soluble en los suelos estudiados fue de 0.8 a 3 cmol kg^{-1} y de 0.02 a 2.4 mM respectivamente.
3. Todos los suelos estudiados requieren del suministro de K para la producción de chile habanero.
4. Es evidente la presencia de una gran variedad de minerales arcillosos, dado que un porcentaje importante de K se libera lentamente.
5. Es posible que ocurra un agotamiento de K en algunos suelos y como consecuencia, según el modelo de simulación, una cantidad apreciable de K debe incorporarse en los primeros días de establecimiento del cultivo.
6. Los valores de la cinética de absorción de K^+ por las raíces de chile habanero fueron $I_{\text{max}} = 4.7 \times 10^{-4} \mu\text{M cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $K_m = 1.15 \text{ mM}$.

7. Las dosis de K que de acuerdo al modelo de simulación deben ser aplicadas son de 108 a 150 kg ha⁻¹ y el momento oportuno de incorporación es importante dada la tendencia del K de ser retenido en los coloides del suelo.
8. Se sugiere la validación posterior en el campo para comparar lo observado con lo calculado.

CONSIDERACIONES DEL ESTUDIO

Una de las metas finales del presente trabajo de investigación es contribuir al desarrollo agronómico del estado de Yucatán. Los avances alcanzados hasta el momento involucran el esfuerzo de mucha gente. Las metas por alcanzar no se limitan al estudio de la disponibilidad y suministro de K, sino al estudio de otros nutrimentos esenciales para las plantas como serían en un principio el fósforo y el nitrógeno a mediano plazo y posteriormente los demás elementos esenciales en la nutrición de chile habanero.

Los resultados de las necesidades de potasio para la nutrición de chile habanero de acuerdo a la capacidad de suministro de los suelos de Yucatán y a las características de la cinética de absorción de las raíces, permiten un uso más eficiente de los fertilizantes. De este modo, se contribuye a optimizar los costos de producción y lo más importante, a minimizar las fuentes de contaminación ocasionado por el uso inapropiado de agroquímicos.

Sin embargo, es importante considerar las limitaciones tenidas en este estudio, por ejemplo:

i) No se consideraron los factores externos que afectan el crecimiento y producción de la planta, como son los relacionados con el clima (luz solar, temperatura y lluvia) y agentes bióticos (organismos benéficos y perjudiciales). Del mismo modo, como factor interno debe considerarse la variedad de chile utilizada; en este caso, los resultados obtenidos son específicos para la variedad criolla y es posible que las características de absorción de K sean diferentes para las otras variedades de chile habanero. Debe tomarse en cuenta que en Yucatán, existe una alta variabilidad genética, e incluso, se desconoce las características de las líneas autóctonas o criollas que surgen de la propia selección de los productores.

ii) Dada la heterogeneidad de los suelos de Yucatán, resulta difícil generalizar cualquier estudio cuando las características de los suelos son consideradas para definir una recomendación general. Por lo tanto, los resultados obtenidos son específicos para cada sitio particular de estudio. Sin embargo, la predicción del desarrollo de los cultivos a través de los modelos de simulación, puede evitar pérdidas económicas generadas de las prácticas de experimentación de prueba y error

desarrolladas en el campo. Una vez validado el modelo de simulación, éste puede ejecutarse el número de veces necesario de acuerdo a las características de cada sitio en donde se pretenda cultivar chile habanero.

PERSPECTIVAS

Entre las perspectivas más importantes que permitan responder las diferencias encontradas entre los suelos evaluados y tener un campo más amplio de aplicación se pueden considerar:

La identificación de las arcillas predominantes en los suelos estudiados, dado que influyen directa e indirectamente en la capacidad de suministro de K por el suelo.

Validación del modelo de simulación SSAND, mediante el establecimiento del cultivo en el campo, para comparar la simulación con lo que ocurre en la realidad. Esto puede realizarse definiendo un programa de zonas prioritarias para la producción de chile habanero.

Evaluar la sensibilidad del modelo SSAND, esto es; verificar si cambios mínimos en los parámetros del suelo y de la planta, tienen una respuesta diferente en la simulación del suministro de potasio por el suelo y la demanda nutrimental del cultivo.

Proponer las variedades de chile habanero con mayor potencial comercial en los estudios de nutrición basados en los modelos de simulación de absorción de nutrimentos.

