

Universidad de Ciego de Avila

Departamento de Agronomía
U.C.L.V.

La dinámica del potasio en suelos Ferralíticos rojos compactados
dedicados al cultivo de la papa.

Tesis presentada en opción al grado Científico de:
Doctor en Ciencias Agrícolas

Autor: Lic. María Borroto Pérez
Tutor: Prof. Titular. Dr. José A. Herrera Altuve

Ciego de Avila
1995

Síntesis

Sobre un suelo Ferralítico rojo compactado de la U.C.T. "Juan Tomás Roig" del Instituto Superior Agrícola de Ciego de Avila, se desarrollaron cuatro experimentos de campo durante los años comprendidos entre 1982 y 1991, con el objetivo de estudiar el efecto sobre el suelo y las cosechas de papa (en rotaciones con maíz), de una fertilización potásica residual. Antes y después de cada plantación y cosecha de papa se realizaron muestreos de suelo para estudiar el fraccionamiento y dinámica del potasio y sus variaciones con el tiempo. En uno de los experimentos se realizaron muestreos a profundidad del perfil al inicio y a través de su desarrollo. Durante un año se midieron decenalmente algunas variables agrometeorológicas, conjuntamente con muestreos de suelo a profundidad, para estudios de movilidad. Para el cultivo de la papa se determinaron rendimientos, producción de masa seca y extracción de potasio. En el ámbito del laboratorio se montaron columnas de suelo que permitieron profundizar en algunos de los factores que más influyen en los niveles y el movimiento del potasio en el suelo. Se calculó la fijación de potasio y las isothermas de sorción en varios momentos de un experimento de campo. No se encontró respuesta a la fertilización potásica en ninguno de los índices estudiados para la papa, obteniéndose un rendimiento medio de 21,7 t/ha, de 3 a 4 t/ha de masa seca total y exportación media para el primer año de 148 kg/ha. En todos los muestreos de suelo los niveles de potasio encontrados fueron altos, entre 20 y 30 cg/kg y suficientes para el desarrollo del cultivo, existiendo variaciones estacionales. El suelo amortiguó de forma adecuada los cambios ocurridos en el potasio cambiante. Tanto en los tratamientos fertilizados como no fertilizados las relaciones intercations con el Ca y Mg no tuvieron afectaciones para el cultivo. El balance del potasio, como proceso dinámico, estuvo influenciado por el poco movimiento del elemento en el perfil, el ascenso capilar, la incorporación de residuos de las cosechas, entre otros, de tal forma que fue posible la obtención de hasta 5 cosechas de papa y maíz sin recibir fertilizante potásico ni detrimento del suelo.

Introducción.

Cuba no posee yacimientos de sales potásicas y por tanto cualquier intento por economizar fertilizante potásico representa para el País una importante vía de ahorro, siempre que esto no implique un deterioro del suelo ni disminución de la producción y calidad de las cosechas.

El programa alimentario que se lleva a cabo en Cuba incluye medidas para el ahorro de fertilizantes, entre las que se encuentra las que pueden lograr una fertilización eficiente en las rotaciones de cultivos, que proporcionen beneficios en la renovación de nutrientes al suelo con cultivos enriquecedores como la papa, ya que el rol del potasio en la producción de cosechas está bien argumentado y la necesidad actual es la elevación de la eficiencia (Darst, 1991). Para lograr esto es necesario tener en cuenta que deben agregarse fertilizantes sólo cuando sean una necesidad para el cultivo, teniendo en cuenta las reservas del suelo y su asequibilidad. Sin embargo la papa recibe anualmente altas dosis de fertilizante potásico (más de 200 kg de K_2O/ha), sin tener en cuenta lo anteriormente expuesto.

En Cuba generalmente la papa se siembra en suelos rojos, obteniéndose en ellos buenos rendimientos (López, 1984). Por la naturaleza de los minerales arcillosos predominantes en estos suelos, es de esperar que posean un potencial potásico bajo, más aún en las condiciones climáticas de Cuba. Sin embargo actualmente estos suelos Ferralíticos rojos, a pesar de ser sometidos a un régimen intenso de lluvias, se encuentran más saturados que otros de su tipo en otras regiones del planeta (Otero et. al., 1986). Es importante tener en cuenta que los suelos Ferralíticos rojos compactados presentan propiedades físicas diferentes al resto de los suelos cubanos de este tipo, aspecto que ha jugado un papel fundamental como criterio básico para diferenciarlos (Camacho et. al. 1983), lo que puede haber influido en su comportamiento.

Con frecuencia se ha reportado pobre o falta de respuesta a la fertilización potásica de la papa, lo que determina la necesidad de estudiar con detenimiento esta fertilización. Sin embargo el número de estudios realizados sobre las transformaciones del potasio en los suelos de regiones tropicales es inferior a aquellos efectuados en los climas templados y los conocimientos actuales sobre el estado del potasio en estos suelos, no proveen de bases científicas confiables para un uso sistemático de las reservas de potasio nativo y la elaboración de sistemas de fertilización eficientes (Mutscher, 1983). Una de las vías para conocer y dirigir la nutrición de la cosecha es el montaje de experimentos a largo plazo que puedan explicar las causas de la variabilidad en el rendimiento del potasio (Drovinéau, 1978), que permitan obtener resultados más fidedignos sobre la cantidad de fertilizantes potásicos a aplicar, lo cual es importante sobre todo en los suelos que no responden a la fertilización potásica durante uno o varios años (Hobt, 1984), que faciliten el conocimiento de datos básicos para calcular ciclos de nutrientes, interacciones entre éstos y otros factores como riego, extracción de la cosecha, aspectos requeridos para derivar recomendaciones sobre dosis y pocas de aplicación de fertilizantes (Cooke, 1985 b). A largo plazo la conservación de la fertilidad del suelo es tan importante como la intensificación de la producción (Bach, 1978). Pero la aplicación de fertilizantes potásicos puede ser racional sólo cuando est basada en un estudio completo de los factores responsables del estado del K en el suelo y en la actualidad se hace necesario construir una política de fertilización sobre bases científicas, tomando en consideración las características zonales y específicas (Prokoshev y Sokolova, 1990).

La estabilidad en los incrementos de los rendimientos de la papa, así como el aumento de su calidad, vinculado al ahorro de fertilizantes, constituyen tareas importantes de la agricultura cubana. Su solución exitosa implica un mejor abastecimiento a la población de alimentos de alta calidad, asegurar un elevado rendimiento económico en las Empresas agrícolas especializadas en la producción de papas y garantizar una utilización más efectiva del suelo como medio de producción.

Por todo lo expuesto esta investigación tiene como objetivos:

- Evaluar la capacidad de los suelos Ferralíticos rojos compactados con alto contenido de potasio cambiabile, para sustentar varias cosechas de papa sin recibir fertilizante potásico.
- Estudiar las formas y variaciones del potasio en el suelo Ferralítico rojo compactado con alto contenido de potasio cambiabile, sometido a una secuencia de papa – maíz

REVISION DE LA LITERATURA

2.1. El potasio en la nutrición de la papa

2.1.1. Funciones y distribución en la planta.

El potasio es absorbido como K^+ y luego se incorpora al metabolismo vegetal, permaneciendo alrededor del 80% en sus líquidos y el resto retenido en los coloides celulares o en algunas estructuras del núcleo, de aquí su gran movilidad dentro de la planta. Es uno de los elementos esenciales no forma, aparentemente, parte integral de componentes estructurales. Su función es fundamentalmente catalítica. El potasio es el elemento que más absorbe la papa y sus mayores acumulaciones ocurren en los tubérculos, en los que puede permanecer hasta el 95% del total de la planta (Yagodin et. al., 1986). Una planta bien provista debe tener más del 4% de K sobre la base de masa seca en el momento de máximo follaje (Van der Zaag, 1973 y Janson, 1978) y en la cosecha los tubérculos contienen 1,5 a 2 % de K. Henriquez et.al. (1990) encontraron que la absorción de K dependió de la presencia de otros iones (como el Mg) en la solución, fundamentalmente de Mg. También Sahota et.al. (1988) reportaron para la papa interacciones positivas N-K y K-Zn y negativas K-Mg.

En la literatura se reportan variadas extracciones y exportaciones de K por las plantas y tubérculos de papa. La mayoría de los autores relacionan este parámetro con el nivel del elemento en el suelo y/o el rendimiento obtenido en la cosecha. Así, por ejemplo, Fundora et.al. (1989), con un nivel inicial de 31 cg/kg de K y rendimiento de 20 t/ha, hallaron exportación de 100 kg/ha para la dosis máxima y en el mismo tipo de suelo pero nivel inicial de K de 38 cg/kg y rendimiento de 36 t/ha, una exportación de 230 kg/ha. Cooke (1985 a) para 35,6 t/ha reporta 161 kg/ha; Dinchev (1972) para 40,3 t/ha señala 117 kg/ha; Yagodin et.al. (1986) plantea que 200 q/ha (20 t/ha) exportaron 180 kg/ha. Para rendimientos similares no hay siempre extracciones similares. Parece que el estado del K en el suelo natural o por fertilización, determina en buena medida el nivel de exportación del cultivo.

El potasio desempeña funciones muy importantes en la planta ya que participa en los procesos que siguen a continuación. Metabolismo y traslocación de los carbohidratos. Cuando hay deficiencias de K se reduce la formación de los carbohidratos y la síntesis de proteínas y polisacáridos como almidón y proteínas. Harrop (1960) considera éste el motivo por lo que la papa presenta altas necesidades del nutriente. Beliaev (1980) reportó que el efecto de la fertilización potásica sobre el porcentaje de almidón varía con el contenido de K del suelo y las dosis utilizadas y puede reducir el rendimiento de almidón (Edelbauer, 1986).

Metabolismo del Nitrógeno. El papel favorable del potasio en la síntesis de proteínas está dado por estimular 3 procesos importantes: la generación de ATP (transporte de energía), la reducción de nitratos a NH_2^- y el suministro de compuestos para la síntesis de aminoácidos. También el K favorece indirectamente la fijación del N atmosférico por las bacterias de tipo Rizobium (Shamsun-Noor et.al. 1991 y Duke y Collins ,1985). Debido a esto, un buen abastecimiento de K favorece la transformación del nitrógeno inorgánico en proteico y el efecto de los fertilizantes nitrogenados.

Régimen hídrico de las plantas. Se sabe que una planta bien nutrida con K aprovecha más el agua. Ramanathan (1987) y Mottran (1988) lo demuestran en sus experimentos con plantas estresadas. La entrada de potasio a las células ocasiona un aumento de la presión osmótica, de modo que favorece la entrada de agua, aumentando la turgencia. Esto hace que desempeñe un papel importante en la apertura y cierre de los estomas que regulan la transpiración del agua y la entrada del CO_2 . (Cooke ,1988 Darst ,1991). Según Yagodin et.al. (1986), el K ejerce influencia sobre la intensificación de la hidratación de los coloides del citoplasma, elevando el grado de dispersión, lo que ayuda a la planta a retener mejor el agua y soportar las sequías temporales. En estudios llevados a cabo con trazadores, junto con métodos sensibles se ha podido comprobar todo esto. (Van Diest, 1978).

Activación de enzimas. Se conocen más de 60 enzimas activadas por K (Darst ,1991), que representa del 20 al 40% de las mismas (Brunet, 1984). Los pequeños iones pueden abrir lugares activos de enzimas y estimular las aglutinaciones de su respectivo sustrato (Van Diest, 1978).

Equilibrio iónico del vegetal. Junto con otros cationes como el Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , participa en el equilibrio entre aniones y cationes y en el equilibrio ácido-base. para mantener el pH adecuado en la planta (Fundora et.al., 1983). Por otra parte la entrada de otros cationes a la planta puede ser afectada por exceso de K o

viceversa. Una de las más importantes relaciones es la de K/Ca, en el equilibrio acuoso de las plantas. Darst (1992) considera al K esencial en la traslocación de metales pesados como el Fe y Zn.

Resistencia al ataque de plagas y enfermedades. En la literatura se reportan efectos favorables del potasio en plantas afectadas por insectos, nemátodos y virus, en especial cuando el contenido de potasio en el suelo es bajo. Fundora et.al. (1983) explican la resistencia a los parásitos y hongos por una mejor formación de las paredes celulares. En la papa aumenta la resistencia de las plantas al ataque por *Alternaria Solani* (Tremols, 1978), al frío, la salinidad y a las enfermedades criptogámicas (Baeyens, citado por Brunet, 1984 y Tandom et.al., 1989). Wagner (1986) encontró que el adecuado suministro de K es esencial para que las papas no sean dañadas por la enfermedad del oscurecimiento interno.

Fotosíntesis. La deficiencia de potasio deprime la actividad fotosintética (Darst, 1992), lo cual puede deberse a la disminución del área foliar de las plantas deficientes (Fundora et.al. 1983). Behboudian y Anderson (1986) encontraron un nivel superior de fotosíntesis en plantas regadas y bien abastecidas con K.

Formación de rendimientos y calidad de los tubérculos. Este elemento produce incrementos en el rendimiento de hasta el 14 % (Perrenoud, 1983), tiene una influencia decisiva en el cultivo de la papa. Guerra (1980) y Giroux (1989) reportan su efecto positivo sobre el peso de los tubérculos y porcentaje de los grandes y puede elevar la masa seca de los mismos (Saikin et.al. 1989). Es que la calidad de los tubérculos, que contienen generalmente mucha agua y carbohidratos, depende fundamentalmente de la intensidad y duración de la fotosíntesis y suministro de agua (Beringer, 1990), procesos dependientes del potasio. Pero el efecto que ejerce este elemento depende no sólo de la cantidad de fertilizante aplicado sino de la variedad de papa, la relación con el N y el P, el contenido de potasio cambiante, la duración del experimento, tipo de suelo, el cultivo precedente y las condiciones del tiempo (Perrenoud, 1983).

2.1.2. Fertilización potásica en áreas paperas.

En Cuba la papa se siembra generalmente en suelos rojos, obteniéndose buenos rendimientos, aunque en los pardos con carbonatos de la región central, los rendimientos son satisfactorios (López, 1984). Sin embargo estos suelos difieren unos de otros en sus reservas de nutrientes minerales, entre ellos el potasio. Debido a esto numerosos trabajos investigativos han tenido como objetivo encontrar las dosis de fertilizante potásico más adecuadas para el desarrollo del cultivo. Mc Dole (1978) y Tremols (1978) consideran poco probable la respuesta cuando la cantidad de K es superior a 14 cg/kg. Beliaev (1976), en la URSS estableció una relación entre el contenido de K en el suelo y los rendimientos de la papa a través de una ecuación de segundo grado, mediante la cual pudieron explicarse las dosis deficientes y efectos negativos. Singh y Grewal (1989) hallaron una respuesta lineal. Sin embargo Giroux y Lierop (1984) en 40 experimentos durante 25 años no elevaron el rendimiento de la papa en los suelos con suficiente K. Otros autores bajo diversas condiciones de suelo y clima han encontrado respuesta a la fertilización potásica. En Cuba Valdés et.al. (1981), sobre suelo Ferralítico de 13,5 cg de K/kg logró elevar los rendimientos de 25 a 32 t/ha con dosis de 200 kg/ha. También Amberger y Gutser (1978) durante 60 años en suelo de 1,6% de K, Rowberry et.al. (1978), sobre suelo loam arenoso en E.U., Lucero et.al. (1983) y Reddy et. al. (1986) sobre suelo arcilloso-aluvial de la India, sobre suelo aluvial de Costa Rica y Edelbauer (1986) sobre un suelo fijador, han obtenido este efecto fertilizando con dosis máximas desde 125 a 900 kg/ha. Perrenoud (1983) al compilar 1 267 resultados experimentales (607 de ocho países desarrollados y 660 de diez países en desarrollo) encontró incrementos promedios de rendimiento de 14, 10 y 11 % para dosis de 1 a 100, 101 a 200 y 201 a 300 kg de K₂O/ha, respectivamente. Sabhota et.al. 1989) y Ramírez y Villagarcía (1994) reportan respuesta a la fertilización potásica de la papa en suelos con contenidos de este elemento de medio a bajo y hallaron una respuesta promedio de 443 kg de papa por kg de fertilizante.

Aunque es difícil hablar de valores críticos universales cuando se consideran diferencias en tipos de suelos, método de extracción utilizado y potencial de rendimiento de diferentes variedades de papa (Roberts y Mc Dole, 1985), en general podría considerarse que cuando la cantidad de K es superior a 11 cg/kg, el cultivo de la papa no responde a la fertilización potásica, índice sugerido por Tremols (1978). Pero habría que tener en cuenta otros factores como las propiedades del suelo que se trate, relaciones K/Ca, K/Mg, K/N, condiciones climáticas y nivel de agrotecnia empleado, entre otros. Beukema y Van der Zaag (1990) plantean que el potasio no siempre afecta el rendimiento sino que tiene relativamente más influencia en la calidad del cultivo, contenido de masa seca, mancha negra, daños, coloración azul después de cocinada y calidad para el almacenamiento. Fertilizar con potasio en suelos donde no se encuentre efecto de este nutriente, requiere un estudio más profundo sobre el balance de este elemento en el área, que incluye los niveles de exportación.

También es importante conocer las transformaciones de K, sobre todo en los suelos tropicales, que han sido menos estudiados que los de regiones templadas. Mallarino et.al. (1991) consideran que el provecho de las cosechas puede incrementarse cuando no se aplica fertilizante potásico a suelos donde los niveles de K son inferiores a 100 ppm, lo cual demostró en experimentos que no recibieron fertilizante potásico durante catorce años. No obstante se han estudiado diferentes índices que aprecien la disponibilidad de K en los suelos y la necesidad de fertilización. La relación $(Ca + Mg)/K$ superior a 100, según Frye (1978) (citado por Fundora et.al. (1988 b) da alta probabilidad de respuesta al abono potásico. Rubio (1982), calculó el potencial potásico que, mayor a 2,5 informa deficiencias de K y menor de 1,5, exceso.

La dosis de fertilizante potásico a recomendar depende de muchos factores, incluyendo el rendimiento esperado, la población de plantas, la variedad, las propiedades del suelo y su nivel de potasio, la eficiencia del fertilizante, el clima y el suministro de agua (Roberts y Mc Dole, 1985). También existen tres tipos principales de aplicación de fertilizantes potásicos en cultivos : de corrección (para aumentar la disponibilidad del elemento en el suelo), de reposición (equivalente a la exportación) y de cobertura (en cultivos ya establecidos) (Fassbender, 1987). En las regiones más importantes de cultivo de papa, las recomendaciones de fertilización oscilan en un margen bastante amplio. En un sumario realizado por Perrenaud (1983), se observa que generalmente exceden los 200 kg de K_2O/ha en países con un promedio de rendimientos de 25 t/ha, mientras que no superan los 150 kg/ha en aquellos con rendimientos promedios menores de 20 t/ha. Para las condiciones de Cuba Deroncelé et.al. (1977 y 1983) sugieren 150 a 200 kg/ha. Valdés et.al. (1979) 90 kg/ha; Valdés et. al. (1981) 120 kg/ha; Guerra (1982) 155 kg/ha en suelos Ferralíticos púrpuras; Barroso et.al. (1986) 70 a 140 kg/ha; Del Castillo et.al. (1982) 58 a 67 kg/ha en un suelo Ferralítico rojo compactado de Ciego de Avila y Fundora et.al. (1989) de 90-100 kg/ha Prummel (1983) diferencia sus recomendaciones de fertilizante potásico según sea el uso que se le vaya a dar a las papas, el tipo de suelo y nivel de K en el mismo. Así en suelos arcillosos si la cantidad de K es superior a 25 cg/kg sugiere no se debe fertilizar y usar como dosis máxima 340 kg/ha cuando este valor sea inferior a 9 cg/kg. Estas dosis, en su mayoría, se corresponden con los niveles de las exportaciones del cultivo. Chevalier (1971) se refiere a estudios realizados por Van der Paauw, basados en un gran número de ensayos de cultivos de papa en el campo , con suelos del mismo tipo pero pobres y enriquecidos en K durante 6 años. A pesar de recibir iguales dosis de K_2SO_4 , el rendimiento fue superior en el rico. Sugiere aplicar inicialmente abonados de enriquecimiento hasta nivel óptimo y después otros que permitan mantenerlo. Tremols (1978) cita autores que sugieren 140 kg/ha para rendimientos de 20 t/ha, debido a que una tonelada de papa en Cuba necesita 7 kg de K_2O . Bezuglaya (1979) reportó en un experimento a largo plazo un índice de 6,6 kg de K por cada tonelada de papa y Sahota et. al. (1988) 10,9 kg/t. Sin embargo estudios realizados por este autor, sobre suelos de diferentes niveles de abastecimiento, muestran que la producción de papa por unidad de fertilizante potásico aplicado, disminuye según aumenta el nivel de potasio en el suelo. Así, por cada kg de fertilizante se pueden obtener 28,7; 10,8 y 0,22 kg de papa en suelos pobres, medios y elevados en K, respectivamente.

Se ha estudiado la influencia que ejerce en el cultivo de la papa el portador utilizado. En la mayoría de los casos se hace referencia al cloruro, sulfato y , a veces, nitrato. Rowberry et.al. (1978), usando esos portadores obtuvieron resultados diferentes durante los 4 años del experimento, pero en su conjunto el mejor resultó ser el KCl, con un rendimiento medio de 24,4 t/ha, pero poco diferenciado del resto. Ramírez y Villagarcía (1994) usando nitrato, cloruro y sulfato no encontraron diferencias entre portadores en suelos de medio a alto en K (2,1% de saturación potásica), sin embargo cuando el porcentaje de K fue 0,7, obtuvieron mayores rendimientos para el nitrato, con incrementos de 18 y 14%. Deroncelé et.al. (1983) consideran la ventaja del KCl sobre el K_2SO_4 desde el punto de vista económico, por diferencia notable. Deroncelé (1977) y Prummel (1983), encontraron que el KCl redujo el contenido de almidón en los tubérculos en mayor medida que el sulfato. Beringer et.al. (1991) reportó que la aplicación de KCl favoreció el crecimiento del follaje de la planta de papa pero retardó el desarrollo de los tubérculos, con respecto al sulfato. Pero, en general, el criterio de no usar el KCl en la fertilización de la papa se debe al hecho de que la presencia de cloruros en el tubérculo reduce su calidad, fundamentalmente el contenido de almidón (Yagodin et.al. ,1986). Se sugiere agregar el fertilizante en un momento tal que se propicie el lavado del cloruro del suelo previamente a la posible extracción del cultivo. Deroncelé (1977) sugiere la aplicación varios meses antes de la siembra. Sin embargo Garz et.al. (1993) no encontraron un notable lavado del cloruro por encima de los 100 cm del perfil de un suelo arenoso con 16,4% de arcilla durante 3 cosechas. Sería entonces importante tener en cuenta para esto los resultados de Tillman et.al. (1991) hallaron diferencias en el movimiento del ion bromuro en la profundidad cuando se humedecía o no previamente el suelo. Este ion permaneció en el primer cm de la columna cuando se aplicó sin agregar anteriormente agua al suelo.

Ha sido objeto de estudio el posible uso del fertilizante potásico para varios años y su posible efecto residual. En la mayoría de los casos las diferentes investigaciones van encaminadas a conocer si se retiene o fija el K al suelo con suficiente fuerza o si tiene reservas potásicas el suelo en cuestión, que permitan su uso. Bezuglaya (1979) estudió durante 15 años la fertilización anual y cada 3 años y concluyó que ambas resultaron igualmente efectivas, tanto en rendimientos como en producción de almidón. En relación a este método, Fassbender (1987) considera que existen pocos estudios en los trópicos acerca del efecto a largo plazo de fertilizantes potásicos sobre las propiedades del suelo, especialmente en condiciones de fertilización intensiva. Esto se cumple en Cuba, ya que los trabajos referidos con anterioridad consideran el efecto de los fertilizantes directamente en la cosecha siguiente. Sin embargo el Instituto de la Potasa postula que sólo ensayos a largo plazo acercan a la realidad (Hobt, 1984).

2.2. El posasio en los suelos.

2.2.1. Contenido y formas.

Contenido. El potasio se encuentra principalmente en la parte mineral del suelo, en la estructura de las redes cristalinas de los minerales primarios y secundarios. Además adsorbido o absorbido en estado intercambiable o no en las partículas coloidales, en los rastros y microorganismos y en forma de sales minerales en la solución del suelo. El suelo puede contener el 2 a 3% de K_2O , lo que significa 25 a 40 t/ha de este elemento en la capa arable (Hernández et al., 1980 y Fassbender, 1987). Fundora et al. (1983) reportan para suelos rojos un contenido total de 0,6 a 0,9%; en los latosoles y latosólicos menos del 0,1%, ya que el proceso de formación de éstos está unido a una casi total destrucción de los minerales primarios, lavado de sílice y bases.

Formas. Se han hecho diferentes clasificaciones de las formas en que se encuentra el potasio en el suelo. De acuerdo con la accesibilidad para las plantas (Yagodin et al., 1986), con el desplazamiento del K con solución de $c(NH_4Ac) = 1 \text{ mol/L}$ (Fundora et al., 1983), con las características cualitativas del enlace del potasio (Fassbender, 1987 y Mutscher, 1980 citado por Fundora et al., 1988 b). Pero en general en todas las clasificaciones se observan aspectos comunes relacionados con la accesibilidad para las plantas: K en la solución del suelo, K adsorbido o absorbido, ya sea en los coloides o en la materia orgánica y K en los minerales más o menos accesibles, de acuerdo con la posición que ocupe, entre las láminas de arcilla o formando parte de la estructura cristalina de los mismos. Cuando se realizan análisis químicos de suelos se identifican el K total, que da una idea de la cantidad total de K presente en el suelo, sin hacer referencia a su solubilidad (Etchevers, 1981) o sus diferentes fracciones: K acuoso (en la solución del suelo) K intercambiable (donde el K se cambia con otro catión en el complejo de intercambio) y el K de reserva (liberado del suelo con un ácido fuerte).

Potasio total. Fassbender (1987) reporta algunos valores para América Latina: en un latosol rojo de Panamá 2 040 kg/ha y en Brasil, en suelos con predominio de caolinita se han encontrado entre 3 130 a 8 670 kg/ha. Fundora et al. (1988 b) indica que existen diferencias en estos valores si se trata de suelos que no han tenido meteorización intensa y los más evolucionados como los Ferralíticos. En estos últimos en K total es menor y depende, en gran medida del K intercambiable y de las escasas reservas de minerales primarios más o menos meteorizados que puedan quedar en el suelo. Fundora et al. (1981 a) indicaron que en Cuba el grado de degradación de los minerales en los suelos Ferralíticos rojos de Ciego de Avila es mucho mayor que en los suelos de La Habana y Matanzas, presentando sólo trazas de feldespatos alterados en la fracción ligera. También Tatevosián y Valdés (1975) citados por Fundora et al. (1988 b) reportaron que en los suelos de Cuba disminuye el K total según aumenta el grado de dispersión de las partículas. Cuéllar (1983) reporta en su estudio valores que oscilan entre 1 085 y 1 807 cg/kg. Los de menos contenidos fueron los Ferralíticos con una media de 1 100 cg/kg, lo que coincide con Rubio (1982). Ponce de León et al. (1987) consideran que la cuantificación del K difícilmente cambiante en el suelo permite valorar las reservas del elemento que dependen de formas de potasio fuertemente adsorbidas contenidas en minerales, que no son extraídas con nítrico o clorhídrico.

Potasio en la solución del suelo. Grimme et al. (1978) consideraron que la $c(K)$ en la solución del suelo es un importante índice de disponibilidad del K, pues el flujo de difusión del K hacia las raíces tiene lugar en la solución del suelo y su velocidad depende del gradiente de concentración que se desarrolle en el suelo adyacente a la raíz. Aunque es sólo una pequeña parte del K total y mucho menos que el requerido por el cultivo, su determinación nos revela si esa cantidad de K está bien regulada. Es una fracción muy lábil y puede cambiar sin que se aplique potasio, con cambios en la humedad del suelo (Quémener, 1986 a) y en la

concentración total de electrolitos. Fassberder (1987) en un estudio de 94 suelos de América Central, encontró valores entre 0,05 y 52 mg/L, aunque la mayoría de los suelos presentaron una concentración entre 8 y 16 mg/L. Chevalier (1971) reporta niveles entre 6 y 20 mg/L. Ramanathan (1983 a) en 25 suelos de la India reportó valores entre 4 y 48 mg/L, con una media de 16. En el 52% de los 94 suelos (Fassberder, 1987), el K contribuye con el 10 al 30% de la suma de cationes en la solución. Si se comparan las c(K) en los suelos tropicales con las de las zonas templadas (7,2 a 391 mg/L) se valoran los primeros como bajos. Dinchev (1972) explica la presencia en el suelo del K acuoso soluble por diferentes causas y que constituye desde 1/5 a 1/10 del potasio cambiante. Mengel and Kirkby (1987) consideran que representa 1 al 3% del K intercambiante. Fundora et.al (1988 b) reporta que en Cuba, Morales (1980) encontró entre 0,5 y 2,41 mg/L en suelo Ferralítico rojo típico, lo que coincide con Brunet (1984). En suelos Ferralíticos rojos de la provincia de Ciego de Avila, Barrios (1988) encontró niveles entre 0,5 y 7,5 mg/L. Fundora (1980) halló valores en los Ferralíticos entre 2,5 y 10,9 mg/L. No obstante para establecer una comparación precisa entre estos valores reportados en la literatura, habría que conocer las relaciones suelo: agua utilizadas, ya que no existe un método universal para la determinación de esta forma de potasio, a diferencia del resto de las fracciones de potasio. Por tanto estos valores aquí recogidos sólo dan una idea de los niveles encontrados.

Potasio intercambiante. Se usa frecuentemente para caracterizar el estado de K asimilable en el suelo y según Boyer (1973) generalmente puede alcanzar al menos 2 a 2,5 % de la C.I.C., ocurren deficiencias cuando su contenido es menor que 0,1 cmol/kg, como promedio y el umbral de respuesta al fertilizante potásico varía generalmente entre 0,15 y 0,35 cmol/kg en suelos tropicales. Fundora et.al. 1988 b) reportan que en regiones de clima húmedo generalmente es menos de 20 y pocas veces superior a 60 cg/kg. En los trópicos representa del 1 al 50 % del K total, aunque puede llegar hasta el 80% (Boyer, citado por Brunet, 1988). Quémener (1986 a) considera que puede estar entre el 1 y 10 % del K total. En general en suelos arenosos es menor de 10 cg/kg y en arcillosos pasa de 50 (Yagodin et.al. 1986). Fundora et.al. 1988 b) en diferentes estudios con suelos representativos de Cuba, no han encontrado diferencias entre el K intercambiante al comparar suelos donde predominan las arcillas del tipo 1:1 con aquellos donde lo hacen las 2:1, lo que prueba que esta fracción depende de otros factores. Sin embargo, al considerarse un gran número de muestras se halla que en suelos menos meteorizados y lavados hay mayores posibilidades de encontrar valores superiores de T, S, Ca y pH (Fundora, 1980). También la relación entre el K intercambiante y el K acuoso soluble fue baja (8,8), lo que muestra una baja energía de ligazón de este elemento en dichos suelos. Rubio (1982) halló valores entre 0,07 y 0,21 cmol/kg y la media obtenida en suelos Sialíticos fue 1,7 veces superior a los Ferralíticos. Barrios (1988) para los suelos Ferralíticos de Ciego de Avila encontró niveles entre 15 y 74,9 cg/kg. Fassbender (1987) resume valores hallados en los suelos de América Latina para el K cambiante; en Brasil con caolinita como arcilla dominante entre 0,11 y 0,65 cmol/kg; en Panamá para el latosol rojo 0,2 cmol/kg; en América Central valores entre 0,33 y 1,34 cmol/kg. Ramanathan (1983 a) en 25 suelos representativos de la India encontró un rango de variación entre 23 y 460 cg/kg.

Un gran número de investigadores consideran en la actualidad que la determinación del potasio cambiante es la mejor forma de caracterizar el estado potásico del suelo con respecto a la nutrición de los cultivos y posiblemente el método más usado es la extracción con NH₄Ac 1 mol/L y pH=7, lixiviando el suelo o por extracción después de haberse establecido el equilibrio. No obstante diferentes autores han hallado una alta correlación entre éste y otros métodos (Cabanattes et. al. 1975, Huluka y Evans, 1993). Por otra parte Ramón et. al. (1991) consideran que, de acuerdo con sus resultados, sobre un suelo fuertemente fijador (93%), el K cambiante es un pobre indicador de la asequibilidad a las plantas. aunque el análisis del suelo solamente, sin considerar otros factores, no basta para realizar recomendaciones muy detalladas en relación a dosis de fertilizantes (Fundora et.al. 1988 b). Grime y Nemeth (1978) encontraron una pobre correlación entre el K intercambiante y el extraído por la planta, debido a que son el contenido de arcilla y sumineralogía, los que modifican la disponibilidad del K intercambiante. Damkofoed (1986) considera que en experimentos a largo plazo aún no existe un método fiable y rápido para determinar las reservas de potasio en el suelo que se encuentran disponibles durante un período de pocos años. Considerando el análisis de esta fracción de K cambiante, la literatura recoge diferentes tablas con índices de interpretación para los trópicos.

Indice	Pagel (72)	Mutcher (80)	Sishov (75)	Etchevers(81)	Fundora (81)
Muy bajo	-	-	-	< 7,8	-
Bajo	< 7	< 5	< 6	7,8 - 11,7	< 7
Moderado	-	5 - 12	-	-	7 - 11

Medio	7 - 14	12 - 16	6 - 12	11,7 - 23,4	11 - 14
Alto	> 14	> 16	12 - 26	23,4 - 50,7	> 14
Muy alto	-	-	> 26	-	-

Potasio de reserva liberable en HNO₃ 1 mol/L. Para la determinación del K no cambiabile se utilizan mucho extracciones del suelo con ácidos fuertes. El HNO₃ 1 mol/L con 10 ó 15 minutos de ebullición es el que más se ha empleado en los trópicos (Rubio, 1982 y Barrios, 1988). En ocasiones los valores reportados en la literatura para el K liberable no incluyen el K cambiabile y en otros casos si y la diferencia entre ambas fracciones se le llama K estructural liberable (Rubio, 1982). En 40 suelos Ramanathan (1983 b) encontró que el K soluble en HNO₃ 1 mol/L fue el que más se correlacionó con la extracción de las plantas (R= 0,909). De forma similar Gosek (1983) en 11 suelos en experimentos de campo a largo plazo encontró en este método el mejor para hallar el K de reserva. Sin embargo Grimme et.al. (1978) y Wood et.al. (1980) consideran que aunque válido, este método sólo indica el poder de suministro a largo plazo y al ser la liberación muy lenta, no asegura las necesidades de cultivos altamente productivos. Sobulo (1973 y 1985) valora como inútil el método en aquellos suelos pobres en minerales de reserva y en ellos, cuando el K intercambiabile es 20 cg/kg la combinación de ambos métodos (cambiabile y liberable) fue el mejor índice del K liberable por las cosechas y cultivos continuos. Chevalier (1971) considera que el conocimiento del K cambiabile no permite tener una opinión sobre la evaluación de las disponibilidades del potasio, ya que una parte puede fijarse o liberarse. Coinciden con esto Wood et.al. (1980) que sugieren el uso del K liberable para medir la capacidad de suplir K en un período largo. En 25 suelos de la India Ramanathan (1983 a) encontró rangos entre 100 y 1950 cg/kg. En Cuba se han valorado estos índices en los suelos más representativos, encontrándose mayores niveles en los suelos poco meteorizados y lavados (Fundora et.al. 1988 b). Fundora (1979), citado por Fundora et.al. 1988 b), reportó en Ferralíticos valores desde 0 a 19,4 cg/kg. Cuéllar (1983) encontró en estos suelos correlaciones significativas y positivas entre el potasio extraído con HNO₃ y los valores T, S, V, (Ca y Mg) intercambiabiles y pH y niveles entre 0,39 y 9,8 cg/kg. Rubio (1982) en Ferralíticos y Sialíticos halló entre 0 y 55 cg/kg y específicamente en los Ferralíticos rojos reportó tenores entre 0,15 y 1,09 cmol/kg. En los suelos Ferralíticos rojos de Ciego de Avila, Barrios (1988) encontró niveles entre 20 y 100 cg/kg. Como se observa el rango de valores es amplio, debido a las características locales, pero también influye la inclusión o no del K cambiabile en ellos. Fundora et.al. (1988 b) refleja los índices que caracterizan los tenores de K dados por Págel (1972), sin incluir el K cambiabile:

Índice	cg/kg de K
bajo	< 20
medio	20 - 40
alto	> 40

En general, el estudio de las diferentes fracciones de K en un suelo ha dependido de las características del mismo. En aquellos con predominio de arcillas 2:1, con altas capacidades fijadoras son más importantes las reservas de K que donde no existan las mismas. En el caso de los suelos Ferralíticos rojos con alto contenido de arcillas 1:1, la fracción cambiabile ha requerido la mayor atención. Sin embargo la falta de respuesta a la fertilización potásica en experimentos a largo plazo sobre estos suelos, sugiere profundizar en la forma en que los mismos se oponen a los cambios de la fracción cambiabile.

2.2.2. Transformaciones del potasio en el suelo.

2.2.2.1. Equilibrio entre las diferentes formas de potasio.

Numerosas investigaciones han permitido establecer que existe un equilibrio dinámico entre las diferentes fracciones de potasio en el suelo, que se desplaza en uno u otro sentido cuando varía el contenido de una de ellas por cualquier factor externo. El término dinámico infiere cambios y movilidad. Este equilibrio ha sido representado de diferentes maneras por diversos autores:

Yagodin (1986).

$K_{\text{red cristalina}} \Leftrightarrow K_{\text{no cambiabile}} \Leftrightarrow K_{\text{cambiabile}} \Leftrightarrow K_{\text{hidrosoluble}}$

Fassbender (1987).

$K_{\text{nativo}} \Leftrightarrow K_{\text{minerales secundarios}} \Leftrightarrow K_{\text{M.O.}} \Leftrightarrow K_{\text{cambiabile}} \Leftrightarrow K_{\text{soluble}}$

Barrios (1988).

$K_{\text{nativo}} \Leftrightarrow K_{\text{fijado}} \Leftrightarrow K_{\text{cambiable}} \Leftrightarrow K_{\text{solución}}$

Mutscher (1980), citado por Fundora et. al (1988 b)

$K_{\text{nativo}} \Leftrightarrow K_{\text{intercambiable}} \Leftrightarrow K_{\text{acuoso soluble}}$

K fijado

Fassbender (1987) explica que la dinámica de los cationes alcalino y alcalino - térreos, debido a no ser componentes de la M.O. y del humus, es menos complicada. Su contenido en el suelo y su dinámica está más relacionada con la composición mineralógica del suelo que otros nutrientes (Mutscher, 1983). En general a menos grado de meteorización el desplazamiento hacia las formas no intercambiables es superior; la presencia de minerales 2:1 posibilita la fijación y, por tanto, la participación de esta fracción de potasio en el equilibrio. El menor contenido de arcilla favorece la presencia de las formas solubles. Pedro (1973) considera que la dinámica del K bajo climas tropicales parece diferir de la de los templados por la ausencia del potasio de reserva y la posible presencia de una reserva formada por minerales potásicos primarios que mantienen el potencial bajo en climas templados, pero tienen cierta eficiencia en los calientes y húmedos. Así Rich (1972), citado por Fundora et.al. (1988 b) refirió que puede haber contribución de los Feldespatos en suelos ácidos fuertemente lixiviados, ya que en estas condiciones es posible no sean tan estables. También Quémener (1986 a) sugirió la necesidad de no despreciar la fracción de arena fina en la liberación de potasio, ya que se han realizado estudios que han mostrado que la dinámica del K parece estar más relacionada con estas fracciones que con las de arcilla y que usualmente las partículas mayores de 2 mm, que generalmente no son identificadas en los análisis de suelo, actúan como trampa de potasio. Boyer (1973) se refiere a experimentos que han mostrado que el polvo de granito puede liberar cantidades importantes de potasio y más intensamente en los climas agresivos de las zonas tropicales. y que pueden entonces distinguirse tres categorías de K disponible: el intercambiable, el rápidamente liberable y el lentamente liberable. Sparks (1986) estudió la cinética de liberación de K en tres suelos de E.U. con un alto porcentaje de arena (65 a 89%) con alta cantidad de feldespatos en esa fracción y en los cuales no había respuesta a la fertilización potásica del maíz. En 30 días ocurrió una sustancial liberación de K y la atribuyó a la naturaleza altamente meteorizada de estos feldespatos. Cuando hay suficiente K intercambiable, éste repone al acuoso soluble, si no, ocurre liberación y el K intercambiable permanece constante, a pesar de la extracción. Este proceso está en dependencia de la intensidad del cultivo y del contenido de K intercambiable y ocurre, sobre todo, en los suelos con minerales micáceos. (Black, 1968, citado por Fundora et. al (1988 b)). Desde el punto de vista dinámico debe considerarse que la fracción absorbida se pone en equilibrio instantáneamente con la fracción de la solución del suelo y todo cambio en esta última entraña una modificación del equilibrio (Chevalier, 1971). Por el contrario el potasio de la red cristalina da lugar a intercambios lentos y condicionados por las fases absorbida y en solución. Fundora (1979)[citado por Fundora et.al.(1988 b)] encontró que a la semana de fertilizar seis suelos en experimentos en macetas, ya habían cesado todos los cambios. Johnston (1986) consideró que el mantenimiento de un nivel satisfactorio de K cambiable en el suelo depende, en parte, de la medida en que dicho K se restituya mediante reservas no cambiables y la liberación de esta fracción depende del estrés a que esté sujeto para suministrar potasio.

Se han desarrollado estudios que demuestran que existe un equilibrio entre las fracciones de K en el suelo, a través de correlaciones entre sus contenidos y cambios. Fundora (1979) citado por Fundora et. al. (1988 b) en experimentos en macetas, durante 9 meses en suelos Ferrítico, Ferralítico, Pardo, Vertisuelo, Hidromórfico y Húmico calcimórfico, reportó aumento del K acuoso soluble, intercambiable, liberable en HNO_3 y HCl y gradualmente extraíble, con la fertilización. Otros autores han hallado diferentes correlaciones entre estas fracciones (Hábil, 1979, Fundora et.al. 1981 y Rubio 1982). Hudcová et.al. (1979) en experimento en macetas notaron que se mantenían constantes el K acuoso soluble e intercambiable y sólo aumentaban con dosis elevadas de potasio. El K liberable fue, sin embargo, un importante criterio del K disponible y la forma más dinámica del K en el suelo. Valdés et.al. (1987) durante 9 cosechas sin agregar potasio, observaron (desde la primera) que las plantas extrajeron K de las reservas, ya que el K intercambiable del suelo fue menor que el extraído. Ganeshtmurth et.al. (1985) en dos suelos típicos de la India, en experimento a largo plazo, no observaron variaciones en el contenido de K intercambiable de forma apreciable, aún después de un período largo, sin embargo el $K_{\text{no cambiable}}$ decreció grandemente y las cosechas removieron más potasio que el aplicado a ambos suelos.

2.2.2.2. Fijación y liberación.

La fijación del potasio en el espacio interlamilar de las arcillas es un fenómeno que tiene gran importancia dentro de la dinámica de este elemento y para conocer la efectividad de los fertilizantes potásicos. Los cationes penetran en los espacios interpaquetales cuando están expandidos y en la red de átomos de oxígeno de las capas tetraédricas, ocupan los vacíos hexagonales atrayendo hacia sí las dos capas de oxígeno, quedando situados en el espacio cerrado (Yagodin, et.al, 1986). Se ha determinado que puede terminar al cabo de un día de aplicarse el fertilizante y alcanzar de 14 a 82 % de éste. Inove (1985) alcanzó la saturación en cinco o seis días. Este proceso ocurre debido a las características específicas de los minerales arcillosos del tipo 2:1 (3 capas que pueden expandirse) y en virtud de las características de los iones K^+ , NH_4^+ , Rb^+ y Cs^+ (radios iónicos 0,13 a 0,165 nm). Para que se produzca la fijación de K es necesario que se deshidrate el ion y se introduzca en el espacio interlamilar, saturando las cargas electrostáticas. El K fijado establece una configuración química estable con el resto del mineral (Fassbender, 1987). Según Dinchev (1972) se necesita una energía para deshidratar el coloide y disminuir el espacio entre las láminas y pueda retenerse el potasio. Quémener (1986) consideró la energía de hidratación del catión un factor importante en la fijación. Si es baja, el agua se pierde entre las capas, éstas se cierran y fijan los cationes. Numerosos autores han profundizado en los factores que influyen en este proceso como los que siguen.

- 1- Tipo y porcentaje de arcillas. En general se considera que son la illita, vermiculita y montmorillonita las arcillas 2:1 de mayor fijación. En ésta influye de forma importante la densidad de carga, cuando es superior a 200 cmol/kg de arcilla o humus, se facilita la fijación y si es menor que 110, se producirá en pequeña escala (Fassbender, 1987). Ramanathan (1981) encontró poca fijación de K en los suelos rojos de la India. También es importante tener en cuenta dónde están localizadas las cargas negativas: sobre las láminas tetraédricas están más cerca y los cationes son atraídos con más fuerza [Quémener (1986b) y Bovadit et.al. (1993)]. La literatura recoge la existencia de tres sitios de sorción principales, de los cuales los correspondientes a las posiciones interlaminares son los fijadores. Quémener (1986 b), luego de una revisión de la bibliografía y un análisis termodinámico, refiere que algunos minerales tienen más de tres posiciones y otros menos, en los que puede influir la distorsión de las láminas de los cristales por la presencia de impurezas. Este autor considera que además son factores importantes que dependen de la red cristalina de las arcillas, la estructura de cuña de los ejes de las láminas unidas de aluminosilicatos que pueden fijar cationes por apareamiento espacial, las fallas o fisuras en esta estructura, la orientación de los grupos OH^- , perpendiculares al plano basal de los minerales trioctaédricos, donde las cargas positivas de los protones repelen fuertemente al K y la supresión de este efecto cuando se reemplazan los OH^- por F^- . Mutscher (1980) (citado por Fundora et.al. (1988 b), cita como factor el grado de separación interlamilar. La alta y anómala selectividad de la caolinita por el potasio pudiera deberse a la impurificación con trazas de vermiculita o montmorillonita. Soto et.al. (1983) coinciden con esto, ya que consideran que los valores relativamente altos de V y pH en estos suelos, son expresiones de que no se encuentran entre los más lixiviados ni intemperizados. Ramanathan (1983 b) estudiando la fijación en 40 suelos del sur de la India, encontró una variación decreciente en aluviales > negros > rojos > laterita, con valores entre 4 y 36 %. Shaviv et.al. (1985) en un suelo con predominio de mica, vermiculita y montmorillonita encontró mayor fijación en la profundidad del perfil, lo que explicó por la parcial saturación lograda en la superficie con la fertilización y manejo orgánico. Bajwa (1981) determinó un 80% en la biodeidita, 69% en la vermiculita y menos del 15% en el resto de las arcillas. Fassbender (1987) recoge resultados de diferentes investigadores en países tropicales que han valorado la fijación potásica. Moss y Coulter en Trinidad de 12 a 26% en suelos jóvenes, 1 a 26% en alofánicos y 1 a 21% en latosólicos. Chaves en Colombia reportó sólo el 6% debido al alto contenido de caolinita del suelo estudiado; Acquaye Mclem y Rice (1967) en Ghana hallaron entre 0,22 y 0,34 cmol/kg para suelos lateríticos y Tinckenell y López en Venezuela, menores valores en los suelos lateríticos que en aluviales. En Cuba se han hecho estudios en los suelos típicos del País. Fundora et.al. (1987) reportó en un Ferralítico rojo una media de 5,3 cg/kg, como máximo de 8,2. Brunet y Granda (1976) y Treto (1977) (citados por Fundora et. al. (1988 b) no hallaron fijación en estos suelos.
- 2- Humedecimiento y secado alternos. El primero posibilita la entrada del K^+ y el segundo el acercamiento de las capas y la exfoliación del agua entre ellas (Fundora et.al.(1988b). Badraouri y Bloom (1991) hallaron que la cantidad de K fijado se elevó con el número de ciclos de humedecimiento y secado. Algunos autores se refieren al secado a altas temperaturas (Dinchev, 1972), de 25 a 300 oC (Inove, 1985) y hasta 70°C (York et.al.1953, citado por Brunet (1988). Sin embargo Badraouri y Bloom (1991) hallaron disminución del K fijado con el incremento de la temperatura desde 40 a 100°C. En el estudio de la

fijación en diferentes suelos se emplean dos vías : la seca y la húmeda. Fundora et.al. (1987) estudiaron en seis suelos de Cuba la húmeda, que considera factible, ya que el suelo en el campo está la mayor parte del tiempo húmedo. Römer et.al. (1983) compararon ambas vías en cinco suelos de Irak y tres de la RDA, obteniéndose valores superiores para la seca (de 14 a 72% más). Similares resultados obtuvieron Samui et.al. (1982). Poss et.al. (1991) encontraron un 20 % de fijación en un suelo caolinítico con minerales arcillosos interestratificados (2 %), y este porcentaje se elevó con alternos humedecimientos (a capacidad de campo) y secados (a 22° C)

- 3- Presencia de iones voluminosos o de óxidos libres en los espacios interlaminares. En suelos ácidos puede encontrarse el Al^{3+} , o su polímero altamente cargado, que disminuye la distancia espacial entre las láminas de arcilla (Dinchev,1972), y ocupa sitios donde pudiera estar el K . El Al sustituye al K en las micas y al Mg en las vermiculitas.
- 4- Iones complementarios en el suelo, pH y enclavado. Yagodin et.al. (1986) considera que existen datos que indican que la fijación se favorece a pH alto. Quémenner (1986 a) encontró en experimentos en columnas, que hay un cambio en este fenómeno en suelos ácidos, cuando el pH se eleva hasta 6 aproximadamente. Brunet (1988) informa que al lavar los suelos durante un experimento, se destruía la capacidad de fijar K de disoluciones de KCl a pH=3, no variando entre pH 3 y 8. Esto se explica porque la adsorción de iones H^+ liberó iones Al_3^+ que fueron fijados (Dinchev, 1972). Este autor cita a un grupo de investigadores que encontraron aumento de la fijación de K^+ por adición de $CaCO_3$ al suelo. Inove (1985) halló elevación de este fenómeno con el pH. Por tanto no es igual el efecto del enclavado cuando el Calcio sustituye al H^+ , que si es al Al_3^+ . La presencia de iones NH_4^+ influye también en la fijación de potasio, aunque hay resultados no coincidentes en esto. Alta concentración de amonio produjo un efecto depresivo sobre la movilidad del potasio y viceversa en los trabajos de Tisdale y Nelson (1970), citados por Brunet (1988). Sippola (1979) estudió la influencia de NH_4^+ en suelos de diferente textura. La relación NH_4^+ / K^+ fijado varió con el aumento de la concentración de amonio, entre 0,5 y 0,83 en la superficie y de 0,58 a 1,7 en el subsuelo. También Kar et.al. (1975) sobre suelos ácidos (pH = 5,3 a 6,6) comprobó que la presencia de amonio en muestras incubadas causó la disminución de la fijación, la adsorción de potasio en forma intercambiable y elevó la concentración de K acuoso. Samui et.al. (1982) hallaron más fijación de K que de amonio por separado, pero juntos la de K fue menor. Sin embargo Bajwa (1987) comparando la fijación del K^+ y NH_4^+ en diferentes arcillas (montmorillonita, vermiculita, beidellíticas, mica hidratada, clorita, Halloysita y arcilla amorfa a los rayos X) y agregándoles estos iones en diferentes secuencias (juntos o uno antes que el otro) concluyó que las cantidades relativas fijadas de cada uno, no dependían de los momentos de aplicación y por tanto, variando dichas secuencias de agregar los fertilizantes, no consiguió mejorar la eficiencia de estos nutrientes. Sherer (1991) encontró que el K redujo la fijación del amonio. Por otra parte Feigenbaum (1986) encontró en experimentos de laboratorio y campo que al tratar un suelo arenoso con agua salina y sódica se producía fijación de K y esta aumentaba en tanto lo hacía la salinidad. Existen autores que consideran que el anión acompañante al potasio puede influir en la fijación. Así Brunet (1988) cita autores que encontraron efecto favorable del fosfato (16 a 21% del K fijado) y otros que reportaron efecto favorable del cloruro. Brunet (1984) no encontró diferencias cuando usó KCl y K_2SO_4 .
- 5- Materia orgánica. La materia orgánica disminuye la capacidad de los suelos para fijar potasio, al parecer, por un efecto similar al del aluminio, de bloqueo de los sitios de fijación. A esto se refieren un grupo de autores citados por Brunet (1988) que encontraron una estabilización de la concentración de potasio disponible en el suelo por adición de cachaza. Sin embargo consideran que este efecto puede no ser tan evidente cuando el suelo no dispone de altos contenidos de K. Guijarro (1983) halló poca influencia de la cachaza en suelos de bajos tenores de K cambiabile.

Los procesos de fijación y liberación son reversibles y están en equilibrio, influenciados fundamentalmente por la aplicación o extracción de K al o del suelo. La liberación posibilita el acceso de las plantas al K. El grado en que ocurran ambos procesos depende de una serie de condiciones climáticas y del suelo (Dinchev, 1972). Yagodin et.al. (1986) se refiere a que en los suelos más humificados se dificulta la liberación del K fijado debido a la formación de una película gruesa de materia húmica sobre la superficie de los coloides, que impide la liberación del K de la red cristalina. El potasio fijado recientemente es movilizado más rápidamente que el nativo y este efecto decrece con la fertilización, por aumentar la $c(K)$ en la solución del suelo (Badraouri et.al., 1992). La liberación ocurre en una etapa rápida, desde las posiciones de borde y otra lenta, desde los sitios interlaminares (Zhu-Yong-Guan et.al. ,1993) y puede ser insuficiente para desarrollar una agricultura intensiva sin adicionar fertilizante potásico (Poss et.al, 1993). El incremento de la temperatura

favorece la cantidad de potasio liberado (Talukdar et.al., 1993). Molina et.al. (1986) calcularon el K liberado de la misma manera que el fijado, a través de:

$$K_{\text{liberado o fijado}} = K_{\text{absorvido}} + K_{\text{cambiable inicial}} - K_{\text{cambiable final}}$$

Fundora et.al. (1988 b) postula que a medida que aumenta la meteorización disminuye la relación limo/arcilla y también decrecen ambos procesos. La liberación de potasio puede conducir a un aumento de la capacidad de fijación, de forma proporcional, aunque durante la liberación puede producirse ensanchamiento de la distancia basal (mayor de 1,4 nm), formación de montmorillonita y bloqueo del espacio interlamilar por iones voluminosos, que no favorecen la fijación. La relación cuantitativa entre ambos procesos tiene importancia práctica, ya que está relacionada con la utilización de las reservas de K. El potasio fijado se cede con mayor facilidad que el nativo. En un suelo fijador de K, son menores las pérdidas por lixiviación.

Dinchev (1972) cita trabajos de 386 suelos de Estados Unidos y Canadá que reportan liberación desde 0 a 1000 cg/kg, considerando que sólo aquellos que lo hicieron en más de 300 tienen suficientes reservas y no necesitan fertilización potásica. Sin embargo Gosek (1983) encontró altas reservas de K, pero liberación tan pobre que fue insuficiente para el desarrollo de las cosechas. La disminución del tamaño de las partículas del suelo es un factor importante en la liberación, ya que las fracciones más finas tienen mayor participación en ella. La mayor cantidad de K liberado proviene de la fracción de arcilla (Fundora et.al, 1988 b). Barrios (1988) halló para los suelos Ferralíticos rojos de Ciego de Avila, variaciones en éstas, de acuerdo con la zona muestreada. Así, el porcentaje de arena osciló entre 8,53 y 24,99, el de limo entre 14,14 y 30,7 y el de arcilla entre 48,82 y 68,91.

2.2.2.3. Movilidad del potasio en el suelo.

El movimiento de los iones en el suelo puede realizarse por dos mecanismos, a escala microscópica por difusión molecular y por convección a escala macroscópica (Herrero et.al, 1984). Los iones que no son adsorbidos por el suelo pasan al flujo convectivo. Kuchenbuch (1988) y Grimme (1990) consideran que la difusión es el proceso principal para el movimiento del K. En general la magnitud de las pérdidas de potasio en el suelo depende de:

- Si el suelo está o no cubierto de plantas. En el primer caso es necesario tener en cuenta la demanda de potasio, el desarrollo radicular, el potencial de exportación y la densidad de siembra.
- La fertilización: dosis usada, naturaleza del fertilizante, época de aplicación y cationes acompañantes.
- Clima: fundamentalmente la magnitud de las precipitaciones y cómo están repartidas en el tiempo, y la temperatura.
- Suelo y sus características físico químicas como textura, C.I.C., contenido de M.O., pH, capacidad de insolubilización o retrogradación, capacidad de inmovilización microbiana.

Cobertura del suelo y fertilización. Cuando existe vegetación las pérdidas de potasio por lavado son menores. Si se fertiliza aumenta la concentración del K de la solución del suelo y por tanto la posibilidad de lavado. Grimme (1985) cita autores que encontraron en un año un lavado del 35% cuando se fertilizó con 260 kg/ha, en un estudio con lisímetro y cerca del 100% en suelo descubierto. Quémener (1986 b) considera que en los trópicos las pérdidas de potasio pueden ser considerables cuando el drenaje supera los 500 mm y se fertiliza, sin embargo son bajas si tiene pocas reservas potásicas. Oliveira et.al. (1982) encontró que en general el porcentaje de K lixiviado aumentó con las dosis en un experimento de laboratorio con un latosol rojo - amarillento, donde se lavó el 5,9% de K luego de aplicar 200 mm de agua y 60 kg/ha. El tipo de anión acompañante puede influir en el movimiento del K. Sadusky y Sparks (1993), en dos suelos de carga variable, hallaron que la cantidad de $K_{\text{adsorvido}}$ decreció así: $\text{SiO}_3^{2-} > \text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{ClO}_4^-$, de tal forma que para 20 mg/L de K en la solución, la adsorción fue 321 a 358 mg de K/kg para el silicato y 58 a 89 en presencia de clorato.

Características físico - químicas del suelo y pH. De acuerdo con la presencia de arcillas del tipo 2:1, si se produce fijación el K es retenido en los primeros cm del suelo. También es importante, por esto, el porcentaje de arcilla en general y su C.I.C. Kósak (1973) usando trazadores y suelo arenoso - calcáreos y chernozem, encontró retención de potasio en los primeros 10 cm. Yagodin et.al. (1986) consideran que la migración del potasio es considerable sólo en suelos arenosos y arenoso - limosos y en los pesados la lixiviación se produce hasta los 40 ó 60 cm. Según Pieri y Oliver (1986) habrá mayor lavado en suelos arenosos, con menos del 2% de M.O., bajo pH y C.I.C. menor que 1,5 cmol/kg. Para Quémener (1986 b) la distribución del K en el perfil debida al agua de percolación está relacionada no sólo con la cantidad de agua, sino con la porosidad y densidad de cada horizonte del suelo. El drenaje varía con la naturaleza del suelo y la profundidad. El encalado influye en el lavado de K fundamentalmente de dos formas: como elevador del pH del suelo y por

tanto de la C.I.C. (disminuye la movilidad) y como aportador de iones Ca^{2+} , que pueden competir por los sitios de sorción del suelo (aumenta la movilidad).

Millar (1967) estudió durante 20 años los efectos de la cal sobre las pérdidas de potasio en un suelo arcilloso y, el encalado intenso las redujo desde 368 kg a 250 kg. Sin embargo otros autores han encontrado que el efecto de encalar es aumentar la lixiviación de potasio. En experimentos realizados por Johnston (1986) permaneció más K cambiante en suelos ácidos (pH = 5 a 6) que en neutros y alcalinos (pH = 7 a 8). Phillips et.al. (1988) estudiaron el lavado de dosis desde 0 a 1 000 kg/ha de K en experimentos en columnas de tres tipos de suelos: arcillosos, arenoso y arcilloso - limoso, encalados hasta pH = 6 y 7. Al agregar cal, sin fertilizar con K, aumentó el lavado de éste. Cuando encaló hasta pH = 6, por aumento de la C.I.C., se redujo el lavado. Sin embargo, cuando lo hizo hasta pH = 7, provocó la sustitución del K^+ por el Ca^{2+} de los sitios de intercambio y aumentó la lixiviación del potasio. Esto explica el doble efecto del encalado sobre el movimiento del potasio.

Norma, intervalo y pureza del agua de riego. Se reportan en la literatura resultados sobre los estudios realizados en columnas de suelo que explican la influencia de estos aspectos en el movimiento del potasio. Herrero et.al. (1984), usando desde 470 a 1 400 mm distribuidos en 7 riegos en 15 días, sobre suelo Ferralítico rojo compactado, encontró un movimiento de las diferentes fracciones de K hasta los 30 cm, fundamentalmente, detectando del 92 a 97% del aplicado, retenidos a esa profundidad, lo cual explica por el alto porcentaje de arcilla en el suelo estudiado (80 a 93%). Grimme (1985) cita trabajos en columnas de suelo Ultisol y aplicando 4 800 mm de agua, detectaron una retención del 80% del K añadido (300 kg/ha) en los primeros 100 cm de la columna. Feigenbaum (1986) usando 420 mm de agua de riego con dos niveles de salinidad (5 y 50 mmol/L), sobre suelo arenoso, sin fertilizar, encontró un lavado del 15 y 50% del K aplicado para la baja y alta salinidad, respectivamente. Cuando se fertilizó con 600 kg de K/ha, el potasio se desplazó más en la columna, lavándose o fijándose en su mayoría, producto de la alta salinidad. Parece que el lavado de K con agua pura está determinado por las posibilidades del suelo de retenerlo, de acuerdo con la cantidad y tipo de arcilla presente. Aplicaciones de agua suficientemente salina pueden provocar lixiviación del K por su desplazamiento del complejo de adsorción del suelo.

Clima. Se ha visto que la selectividad por el K disminuye cuando aumenta la temperatura, ya que pasa más cantidad de K total a la solución del suelo (Quémener, 1986 a), lo que puede conducir a una mayor migración hacia las profundidades. Según Pedro (1973) el papel destructor de la temperatura crece con la disminución del grado de mineralización del agua, por esto este efecto es mayor en los trópicos húmedos. Con las precipitaciones pueden lavarse nutrientes desde diferentes partes de la planta hacia el suelo, de gran importancia en los bosques tropicales (60 a 170 kg/ha/año). También puede causar un desplazamiento del elemento hacia las profundidades. Según Mutscher (1983) el aumento de la humedad del clima favorece la destrucción de los minerales. Johnston (1986) encontró más K cambiante en suelos constantemente húmedos que en aquellos de alternos secados. Otero et.al. (1986), en estudios con lisímetros en suelo Ferralítico rojo con 73,6% de arcilla encontró mucho mayor lavado en la época lluviosa del año (76%) aunque fue compensado por el ascenso capilar.

2.2.2.4. Relaciones Cantidad / Intensidad.

Caracterizar el régimen potásico del suelo debe prever no sólo la determinación cuantitativa de las formas móviles de este elemento en el suelo, sino reflejar también el grado de su movilidad y, por tanto, de su accesibilidad para las plantas (Yagodin et.al,1986). Quémener (1986 b) da mayor importancia a la aptitud del suelo de pasar de una fracción de potasio a otra que al contenido individual de cada una de ellas. El suministro de potasio por el suelo a las plantas puede definirse por un factor de intensidad (I), que indica el potasio disponible inmediatamente a las plantas y un factor de cantidad (Q), que se relaciona con la reserva que existe en el suelo. La interrelación de los factores Q/I describe la capacidad buffer potásica del suelo (PBCK) y refleja la resistencia del suelo a cambios en la concentración de potasio en la solución del mismo y debe ser considerada en los exámenes de interpretación del suelo (Cox 49 and Uribe, 1992 a). Acquaye (1973), cita autores que consideran dos aspectos en la capacidad buffer: el amortiguamiento que produce la fuente cambiante y el amortiguamiento de dicha fuente cambiante por la reserva no cambiante. Existen métodos que permiten evaluar la resistencia del suelo a los cambios en el potencial potásico, mediante isotermas de sorción. En Cuba desde la década del 80 se le está prestando mayor atención al uso de las isotermas para evaluar el comportamiento del K en el suelo (Fundora, 1980; Navarro y Torres,1980). Las relaciones Q/I para diferentes tipos de suelos son distintas, dependiendo, fundamentalmente de la mineralogía de las arcillas presentes: si

predominan las 2:1 o las 1:1. Para suelos con predominio de caolinita, como los tropicales, diferentes autores han encontrado líneas rectas, que asocian con la ausencia de illita y la adsorción de K sólo en las posiciones planares, aunque Mutschler (1983) y Pieri y Oliver (1986) consideran posible encontrar silicatos del tipo 2:1 residuales en la fracción arcillosa de los suelos caolíníficos. También Izquierdo et.al. (1991) estudiando algunos suelos Ferralíticos rojos de las alturas del Cacahual, hallaron trazas de montmorillonita para los compactados, a partir de 100 y 115 cm.

Los parámetros que caracterizan las isothermas de sorción son AR^0 o $c(K)_0$, $-\Delta K_0$ y PBC^K . Yu et.al. (1989 a y b), desarrollaron un método para la determinación directa de AR^0 en los suelos, con electrodos selectivos de K y Ca. En algunos trabajos investigativos, este parámetro se sustituye por la $c(K)$, como factor de intensidad, ya que parece dar las mejores bases para definir grupos de suelos con similar dinámica de K. (Fundora, 1979, citado por Fundora et.al. 1988 b; Mutschler, 1983, Fardeau, 1992).

Fundora (1979) citado por Fundora et.al. (1988 b) estudiaron las isothermas de sorción en suelos con predominio de arcillas 1:1 ó 2:1, encontrando los mayores valores de las PBC^K en los segundos. Similares resultados reportan Navarro y Valdés (1982) y Rubio (1982). La fertilización y extracción de los cultivos pueden variar los parámetros de las isothermas. La fertilización potásica eleva la $c(K)_0$ en equilibrio, disminuye la máxima sorción del suelo y aumenta la desorción, aunque las PBC^K permanecen aproximadamente constantes (Navarro y Valdés, 1982 y Fundora et.al. (1988 b). Bijay Singh et.al. (1979) reportaron alta correlación entre las AR_0 y las dosis de fertilizante potásico aplicadas y Torres et.al. (1983) encontraron elevación de las AR_0 por la fertilización. Acquaye (1973) no halló influencia del pH en las AR_0 y en zonas de mayores precipitaciones decrecieron las $-\Delta K_0$, mientras que la M.O. influyó favorablemente sobre este parámetro. Con la extracción de los cultivos cambian las AR_0^K . Pieri et.al. (1986) encontraron este efecto a pesar de la aplicación regular defertilizante potásico en un cultivo intensivo y Fassbender (1987) cita a Mielniczuk que con la extracción notó disminución de AR_0 . Rubio (1982) encontró diversos valores de estos parámetros para los suelos de Cuba dedicados al cultivo de la caña de azúcar y, en general, no correlacionaron con la respuesta del cultivo a la fertilización. No existió correspondencia entre el K intercambiable y la capacidad buffer de los suelos. Acquaye (1973) encontró correlación positiva entre la PBC^K y el contenido de arcilla, K fijado, K lábil ($-\Delta K_0$) y extracción de K no intercambiable y por esto sustenta la utilidad de la PBC^K como una medida de la capacidad del suelo de mantener la intensidad de K. Barrios (1988) estudió para los suelos Ferralíticos rojos de Ciego de Avila los fenómenos de sorción a través de las isothermas de Langmuir para el potasio y la presencia de los cationes competitivos NH_4^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Siempre el incremento de la fertilización hizo decrecer los porcentajes de K adsorbidos, por disminuir los sitios de adsorción "libres" en el complejo de cambio, aunque el amonio no compitió con el K por estos sitios. El porcentaje de arcilla y la C.I.C. fueron los principales parámetros que controlaron la adsorción de K en estos suelos. Sparks et.al. (1982) estudiaron el efecto de la temperatura en la disponibilidad del potasio a través de las isothermas de sorción, en un suelo con predominio de arcillas 2:1. Al elevar de 0 a 40°C disminuyó la cantidad de K adsorbido y la ΔK y se elevó la AR^K . La PBC^K disminuyó al igual que el coeficiente de selectividad por el K. Datta (1985) determinó las relaciones Q/I en 6 suelos sometidos a continuos y alternos humedecimiento y secado y los comparó con los suelos secados al aire. El tratamiento húmedo no afectó la AR_0 ni la PBC^K . Rubio (1982) caracterizó un grupo de suelos cubanos, entre ellos los Ferralíticos rojos, usando diferentes métodos de análisis, que miden las $c(K)$ o su relación con otras variables, según se muestra:

Subtipo de suelo	HNO ₃	NH ₄ Ac	CaCl ₂	Potencial potásico	-ΔK	AR ₀ ·10 ⁻⁴	PBC ^K
1- Desaturado	0,26	0,13	0,09	2,62	4,29	24	46
2- Hidratado	0,34	0,36	0,20	2,59	0,49	50	84
3- Desaturado	0,20	0,07	0,07	3,01	0,12	13	92
4- Típico desaturado	0,15	0,11	0,08	3,06	0,16	22	73
5- Típico saturado.	0,29	0,25	0,13	2,81	0,38	22	173
6- Hidratado	0,21	0,22	0,10	2,87	0,28	18	111
7- Típico	1,09	0,64	0,37	2,05	26,52	190	36
8- Pardo conc.	0,71	0,73	0,36	2,32	39,00	70	142

En la tabla se señala (con el 7) el suelo de Ciego de Avila estudiado. Se debe notar la diferencia entre él y la mayoría de los restantes dentro de su clase. Sólo éste y el último en la tabla (de Matanzas) resultan óptimos, al

valorarlos mediante el potencial potásico. Sin embargo hay que tener en cuenta que el resto de los suelos sometidos a similares regímenes de fertilización (por estar dedicados al mismo cultivo), pudieron haber tenido niveles no tan diferentes en los parámetros estudiados. Esto puede inducir a pensar que el comportamiento de los suelos Ferralíticos rojos de Ciego de Avila, que han recibido altas dosis de fertilizante potásico, puede deberse a otras causas que los hacen diferentes a otros de su mismo tipo. Es importante entonces profundizar en la dinámica del potasio en ellos.

2.2.2.5. Balance del potasio.

El potasio en el sistema suelo - planta puede verse formando parte de un sistema abierto y dinámico en el cual las ganancias y pérdidas están envueltas en un proceso de transformaciones y movimientos (Schoeder,1978) y es un criterio importante para definir la efectividad económica del uso de fertilizantes. El balance del potasio depende de la magnitud de las pérdidas y ganancias. Fundora et. al. (1988 b) consideran entre las primeras las extracciones de los cultivos, la lixiviación, el lavado y la erosión. Como ganancia tienen en cuenta el abonado. Cooke (1986) incluye dentro de éstas el potasio que llega con el agua de riego y Quémener (1986 b) el aporte de los residuos de cosechas. Fassbender (1987) añade el ascenso capilar y el depósito de las lluvias y Mengel (1978) la lixiviación del potasio desde los minerales del suelo.

Perdidas.

Lixiviación. Depende del movimiento del elemento en el suelo. En aquellos muy meteorizados y lixiviados del trópico con predominio de la caolinita y arcillas de hidróxido se retiene el potasio con menor energía de ligazón y se facilita su movimiento. (Págel et. al.72, citado por Fundora et.al.(1988 b).

Lavado. En general el lavado del potasio no es un problema para la mayoría de los suelos, excepto en aquellos de textura gruesa y baja C.I.C. [Fundora et.al. (1988 b)]. No obstante Omoti et.al. (1983), bajo lluvias anuales de 1923 mm, encontraron un lavado de K de 11 kg/ha del fertilizante y 43 kg/ha del nativo (éste último representa el 15% de las cantidades totales existentes en los primeros 60 cm).

Extracciones. Las exportaciones del cultivo varían de acuerdo a las extracciones que realice y la magnitud en que extraiga potasio la parte de la planta que se va del campo con la cosecha. Esta extracción puede variar más entre años que entre niveles de potasio aplicado, lo cual se debe a cambios de temperatura que provocan liberación del K total de la solución. (Quémener, (1986 b). Esto puede afectar los estimados del balance del potasio.

Erosión. Como el potasio se distribuye a través del perfil, las pérdidas superficiales pueden ser compensadas por las fuentes más profundas del perfil (Fundora et.al; 1988 b).

Ganancias.

Fertilización. Constituye una ganancia de K para el suelo y puede presentar efectos residuales si la aplicación inicial es superior a las necesidades del cultivo y si el excedente queda en forma cambiante; también si una parte del abono es lentamente soluble, y continúa disolviéndose de forma gradual posteriormente; además cuando una parte del elemento soluble aplicado se fija o forma combinaciones orgánicas, posteriormente liberables (Brunet,1988).

Lluvias. Fassbender (1987) reporta que el depósito de potasio por las lluvias en la mayor parte de los estudios, se encuentra entre 5 y 10 kg/ha/año y son siempre menores que las de escurrimiento foliar. Steinhart y Fassbender (1979) en los Andes de Venezuela recogieron el agua de lluvia en pluviómetros, encontrando $2,6 \pm 0,1$ kg/ha/año. En Cuba Otero et.al. (1986) durante tres años reportaron una ganancia de 42,9 kg/ha/año por esta vía.

Agua de riego. Como promedio los ríos mundiales contienen 2,3 mg/L de K (Cooke, 1986), por tanto los aportes por esta vía son pobres.

Ascenso capilar. Esta ganancia se diferencia del resto en que no proviene de una fuente fuera del sistema suelo - planta, sino que constituye un aporte de las profundidades del perfil y una vía de enriquecimiento de la capa arable del suelo. Otero et.al. (1986) cita un trabajo inédito de Rivero donde se estudió el régimen hídrico del suelo Ferralítico rojo, demostrándose que de los 70 cm de profundidad hacia arriba existe un flujo continuo de humedad y el aporte de K por esta vía resultó ser de 127 kg/ha/año.

Residuos de cosechas. El potasio de los residuos es equivalente al del fertilizante potásico, con un efecto a veces retardado. Quémener (1986 b) encontró que el K intercambiable variaba con la época de muestreo debido a la incorporación de los residuos de cosecha, además de los factores climáticos, en dependencia del tiempo que medie entre la incorporación de los residuos y el momento de muestreo y puede elevar el potasio intercambiable, o establecerse un equilibrio con el resto de las fracciones en el suelo. Gutser (1986) en

experimentos de campo probó que cuando no se agregó fertilizante inicial, las plantas usaron del 50 a 90% del K de los residuos vegetales y animales. En caso contrario, sólo el 10%. Otero et.al (1986 a) calcularon que la paja de la caña de azúcar contenía 1,16% de K, muy superior al resto de los nutrientes estudiados y lo valoran como un aporte importante al suelo. Withers (1991) evaluó en diferentes cosechas el contenido de K en la paja de trigo y cebada (en general del 1%) encontrando como tendencia que los niveles de K en la paja fueron mucho mayores en años secos que en años húmedos. Cox y Uribe (1992, a) citan trabajos que demuestran que la aplicación inicial de 125 kg/ha de fertilizante potásico seguido de la incorporación de restos de cosecha, dio suficiente K para cuatro cosechas consecutivas de soya. Sin embargo al sacar la paja el cultivo requirió de una fertilización anual. Por tanto sugiere que el manejo de la paja debe ser considerado en los análisis de interpretación del K del suelo.

Balance. Se reportan en la literatura diferentes maneras de realizar balances de K, para diversos cultivos, de acuerdo con los parámetros medidos como aportes o pérdidas. En la mayoría realizan el balance agrícola y el cambio depende, fundamentalmente, de la necesidad y extracción que haga dicho cultivo para cada dosis usada. Badraoui et.al. (1992) consideran la diferencia entre el K extraído acumulado en la planta y el cambio de K cambiante. Si es positivo, se ha liberado del nativo, si es negativo se ha fijado y si es cero el extraído está balanceado con el descenso del K en el suelo. Fundora et.al. (1988 b) citan a un grupo de autores en Cuba que han realizado estos balances de potasio en suelos Ferralíticos rojos con caña de azúcar encontrando valores negativos. Brunet (1984) en suelo Ferralítico rojo compactado y cultivo de piña, encontró balance negativo de K en el testigo, pero positivo con el uso de abonos. Consideró como aportes el de los fertilizantes y material de siembra; como pérdidas la exportación y el movimiento en el perfil. Cuando incluyó en el balance los valores del K intercambiable y K liberable en HNO_3 , antes y después de la cosecha, observó que hubo liberación de K desde las reservas del suelo. Cooke (1986) reportó balances negativos de K para diferentes rotaciones de cultivos. Roose et.al. (1973), durante 3 años, hizo balances de K, teniendo en cuenta como aportes la fertilización y las lluvias y pérdidas la exportación y lixiviación. Sólo fue positivo para dosis de 1 661 kg/ha. Otero et.al. (inédito) en experimentos con caña de azúcar por tres años, encontraron balance positivo para el K de 184 kg/ha por año. Consideraron como aportes la fertilización, precipitaciones y ascenso capilar y dentro de las pérdidas el lavado y la exportación de los tallos. Chevalier (1971) en un experimento en macetas realizó dos balances: uno considerando la fertilización y extracciones del cultivo (1) y otro teniendo en cuenta el K intercambiable antes y después (2). Cuando el balance (1) fue negativo, el descenso del K intercambiable fue inferior a lo esperado, según (2), lo cual se debió a la liberación de K desde las reservas. Para balances positivos resultó que el aumento del K intercambiable fue inferior al calculado en (2), debido a la fijación. Sugiere este autor considerar en los balances otras formas no intercambiables de K. Resultados similares obtuvo Subba Rao (1984) en un cultivo continuo sin fertilizar en la India donde, a pesar de balances negativos que trajeron pérdidas de 205 a 330 kg/ha, no se reflejaron cambios de K disponible en 6 a 8 años. Durante los primeros años el contenido de esta fracción de K descendió, para luego estabilizarse, por reemplazo de las reservas. Sugiere tener en cuenta el $K_{\text{liberable}}$ en HNO_3 en el balance. Authier et.al. (1990) propone una ecuación para el cálculo del balance:

$(F-E) + FI - D = Sf - Si$, donde F es el K del fertilizante, E el exportado, D el lavado y Si y Sf se refieren a los niveles inicial y final del elemento en el suelo. Van Diest (1994) consideraron como entradas en el balance del potasio, la fertilización mineral y orgánica y salidas la extracción por las cosechas, el lavado y erosión por el agua. Todo esto le dio como resultado un balance negativo de 70 kg/ha/año.

MATERIALES Y METODOS.

3.1. Características edafoclimáticas del área experimental.

En el gráfico 1 aparece el climatograma que recoge estas características durante el tiempo en que se desarrollaron los diferentes experimentos, las cuales correspondieron a las condiciones medias para la temporada de papa en Cuba, excepto en 1983 con mayor incidencia de las lluvias al inicio del año. El suelo estudiado fue Ferralítico rojo compactado (A.C.C., 1975), un Ferralsol (F.A.O., 1988) u oxisol (Soil Survey Staff, 1992), caracterizado según se muestra en la tabla 1, para los primeros 30 cm de profundidad. El suelo es arcilloso, con pH ligeramente ácido, bajos los contenidos de M.O. y fósforo y alto nivel de potasio cambiante.

3.2. Métodos experimentales.

3.2.1. Experimentos de campo.

Durante los años 1982 a 1991 se desarrollaron cuatro experimentos de campo estacionarios con diferentes tiempos de duración: 1 año (1985-86), 3 años (1982-85) y 5 años (1986-91), sobre un suelo Ferralítico rojo compactado de la UCT "Tomás Roig" de la UNICA. Cuando la duración fue superior a un año se alternaron los cultivos de papa (variedad Desiree, nacional de calibre II) y maíz (híbrido T-66), de lo contrario sólo se sembró la papa. Los sistemas de fertilización empleados están en las tablas 2. En todos los experimentos se utilizó un diseño de bloc al azar o factoriales, en todos los casos con cuatro réplicas.

Durante el segundo año del experimento 3 las parcelas se dividieron en dos, aplicándole Mg a una de las mitades. Durante el tercer año estas parcelas volvieron a dividirse, agregándose a dos de las cuatro, de nuevo, las dosis de potasio iniciales.

De esta forma existen parcelas que recibieron K sólo el primer año, otras que además se les agregó Mg el segundo año y otras que recibieron K, Mg y K (el tercer año de nuevo). En el experimento 4, al cabo del cuarto año, se dividieron las parcelas y se les agregó a una de las mitades la dosis de fertilizante inicial.

El área inicial de todas las parcelas fue de 79,2 m², con 11 surcos de 8 m de largo y distancia de siembra de 0,25 x 0,90 cm. Se realizó la fertilización NP localizada antes de cada cultivo con dosis de 140 kg/ha de N como NH₄NO₃ y 180 kg/ha de P₂O₅ como Superfosfato sencillo El potasio se agregó a voleo como K₂SO₄ y KCl (sólo en el exp.4). El Mg se aplicó en dosis de 40 kg de Mg/ha como MgSO₄. Las labores agrotécnicas se realizaron acordes con el Instructivo técnico del cultivo de la papa (1978).

Se muestreó el suelo de los primeros 30 cm al inicio y entre cada cultivo, en Noviembre (muestreos señalados con números impares) y abril (números pares), para análisis químico de cationes cambiables y/o fraccionamiento del K: acuosoluble, cambiante, liberable y total. En el experimento 4 se realizaron muestreos hasta un m de profundidad al inicio del mismo, al final de la primera y quinta campañas y cada diez días durante 30 decenas desde febrero a noviembre de un mismo año. A las muestras de suelo semestrales también se hicieron análisis dinámicos mediante isotermas de sorción. Con el objetivo de estudiar la posible influencia de algunas variables agrometeorológicas en la dinámica del K en el suelo, se tomaron muestras (replicadas 4 veces) de los pasillos del experimento 4, hasta 100 cm del perfil, cada diez días y durante las 30 decenas ya referidas, haciendo coincidir con ellos las medidas de las variables : evaporación (Ev), precipitaciones (pp), temperaturas del aire máxima (Tma), media (Tm) y mínima (Tmi), Insolación (Ins), velocidad de viento inferior (Vi), humedad relativa (HR), temperatura del suelo (TS) y humedad del suelo (HS), todas en el área experimental. Las mediciones se realizaron como sigue:

- Ev : evaporímetro de tanque clase A
- pp : pluviómetro y pluviógrafo
- T : termómetros de máxima, mínima y ordinario
- V : anemocontador superficial
- HR: psicrómetros estacionarios
- TS: termómetro de suelo TM 3
- HS: método gravimétrico.

Para cada cultivo de papa se midieron: rendimiento en la cosecha, producción de masa seca total a los 60 días y de los tubérculos en la cosecha, extracción de K a los 60 días y exportación. Para las evaluaciones durante el desarrollo de los cultivos, se tomaron cinco plantas por parcela. En las campañas dos y cinco del experimento.

4, las cosechas se realizaron a los 70 días por ataque de *Alternaria Solani*. Al finalizar las campañas de papa se calcularon los balances agrícolas de K y teniendo en cuenta en dichos balances, las variaciones del K cambiante en los diferentes experimentos y con las cosechas.

3.2.2. Experimentos de laboratorio.

Para desarrollar los experimentos de laboratorio y determinar propiedades del suelo se compuso una muestra de suelo única, representativa del área experimental.

3.2.2.1 Experimentos en columnas de suelo.

Con el objetivo de estudiar en condiciones controladas el movimiento de K en el suelo y algunos factores que influyen en el mismo, se montaron los experimentos en columnas de suelo, método usado con diferentes objetivos en el mundo y con buenos resultados (Coltman et.al. 1991), replicándose tres veces. En cada tubo plástico de 50 cm de largo y 5,6 cm de diámetro (área 24,63 cm²) se agregó un kg de suelo del primer horizonte, tamizado a dos mm, se compactó hasta alcanzar la densidad del suelo en el campo (1,2 g/cm³) y humedeció inicialmente a capacidad de campo (30,4 %/b.s.). Para la fertilización se usaron los mismos portadores NPK que en el experimento de campo 4. Las columnas se situaron a la intemperie (excepto en caso de lluvias) y permanecieron durante 90 días, al cabo de los cuales fueron seccionadas cada 2,5 cm para análisis químicos de cationes. Las variables a estudiar en los diferentes experimentos en columnas aparecen a continuación.

<i>Tratamiento</i>	<i>Variable</i>	<i>Norma de Riego</i>	<i>Dosis de K₂O / ha</i>
1	Dosis de K ₂ O	1	0, 160, 320, 960, 3200
2	Normas de Riego	1 2 3	0, 320
3	En la Intemperie	1	0, 320
4	Fertilidad Potásica del suelo y profundidad de fertilización	1	0, 320

Las dosis empleadas de fertilizantes (excepto 960 y 3200 que son múltiplos) y norma 1 de riego se tomaron del experimento de campo 4 y del Instructivo Técnico para el cultivo de la papa (1978), respectivamente, tratando éste último de forma diferenciada los primeros 15 días, los 30 siguientes y la etapa final del cultivo. Se elevó esta norma de riego 2,27 veces en esos mismos períodos, pero usando intervalos de un día (Norma No. 2) ó cinco días igual que el usado en la papa (Norma No. 3). De todo esto resultó lo mostrado en la tabla siguiente.

<i>N^o</i>	<i>Normas de riego empleadas</i>			
	<i>m³/ha</i>	<i>ml / columna</i>	<i>I.R. (días)</i>	<i>Tiempo de Duración (días)</i>
1	600	37	5	15
	1500	62	5	30
	2240	69	5	45
Total	4340	1104		90
2	121	29	1	90
Total	9890	2610		
3	605	145	5	90
Total	9890	2610		

Durante el desarrollo de los experimentos se colectaron las muestras de agua percoladas de las columnas para análisis catiónico. El agua de riego fue natural (0,37 mg de K/L). El suelo utilizado contenía 30 cg/kg de K cambiante (rico), excepto en el tratamiento 4 que se usó además uno con 10 cg/kg de K (pobre). El fertilizante fue localizado en el primer cm de las columnas, excepto en el tratamiento 4 que también fue situado en la mitad del tubo, colocando arriba y/o abajo del mismo, suelo rico o pobre en K cambiante, de tal forma que fueron considerados 6 subtratamientos.

Subtratamiento	Posición del fertilizante	<i>c(K) cambiabile (cg/kg)</i>	
		Arriba (25 cm)	Debajo (25 cm)
4.1	Superficial	30	30
4.2	Superficial	10	10
4.3	20 cm	30	10
4.4	20 cm	10	30
4.5	20 cm	30	30
4.6	20 cm	10	10

3.2.2.2. Intercambio catiónico en columnas.

En tubos de 80 cm de altura y un cm de diámetro se colocaron 189g de suelo tamizado a dos mm hasta alcanzar la densidad de campo, humedeciéndose inicialmente a capacidad de campo con 60 mL de agua destilada y replicándose tres veces. Se hizo pasar 1 L de disoluciones de NH₄Ac (1 mol/L y pH=7) (que es la usada para determinar cationes cambiabiles) o KCl (0,1 mol/L), (equivalente a dosis muy altas de fertilizante potásico) que fueron recogidas en porciones de 60 mL para análisis químicos de cationes desplazados. Cuando terminaron de pasar las disoluciones, se agregaron 60 mL de etanol con el objetivo de arrastrar el agua de los poros del suelo. Luego de esto se dividió en ocho fracciones la columna de suelo y se tomó una muestra representativa del mismo y sometió el mismo a análisis químicos de cationes.

3.2.2.3. Fijación de potasio.

Se utilizó el método de Waugh y Fitts (Valdés et.al , 1984).

3.2.2.4. Intercambios K - Ca.

Se agitaron 10g de suelo con 100 mL de disoluciones de relaciones K/Ca crecientes (2/8, 3/7, 4/6, 5/5, 6/4, 7/3, 8/2, 9/1) con 15, 30 ó 100 mmol de equivalentes totales, durante 1 hora. Al cabo de ese tiempo se hallaron las concentraciones de Ca, Mg y K en las soluciones remanentes, en contacto con el suelo.

3.3. Métodos químicos de análisis de suelo.

Para todos los análisis se utilizó suelo seco al aire y tamizado para 2 mm. Los contenidos se expresan como c(X), independientemente de las unidades.

3.3.1. Potasio acuosoluble.

100g de suelo se pusieron a capacidad de campo durante 24 horas (Fundora , 1986).

3.3.2. Cationes cambiabiles.

Durante 1 h se agitaron 10g de suelo con 100 mL de NH₄Ac 1 mol/L y pH=7 (Kaúrichev, 1984).

3.3.3. Potasio liberable en HNO₃.

Se utilizó el método de Haylock , 1956, citado por Fundora et.al. (1980).

3.3.4. Potasio total.

Se empleó el método de Smith, citado por Torres et.al. (1983).

3.3.5. Isotermas de sorción.

Se agitaron muestras de 10g de suelo con 100 mL cada una de soluciones de concentraciones crecientes de K (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 mg/L) y 0,05 mol/L de Calcio. Al cabo de 3 horas se centrifugaron para analizar K en las soluciones. A partir de estos datos se calcularon las ΔK , $c(K)_0$ y PBC^K , luego de los análisis estadísticos. ΔK se determinó por la diferencia entre los contenidos de K antes y después de la agitación (Fundora, 1986).

Las relaciones Q/I se hallaron por las pendientes de las rectas obtenidas al plotear las ΔK (eje Y) vs K_{final} (eje X) y mediante regresión lineal. Las $c(K)_0$ fueron los interceptos con el eje X de las ecuaciones de las rectas obtenidas en las regresiones.

3.3.6. Potasio interlamina extraído por disociación térmica.

Se siguió la técnica de Koltermann y Troug (Kaúrichev, 1984).

3.3.7. Suma de bases de intercambio.

Se siguió el método de Kappen Guilkovich (Kaúrichev, 1984).

3.3.8. Acidez hidrolítica.

Se utilizó la técnica reportada por Kaúrichev (1984). En todos los casos el Na y K fueron determinados por fotometría de llama usando un fotómetro de llama phlazo 4 y el Ca y Mg por complexometría.

3.4. Análisis estadísticos.

Los análisis de varianza y regresión lineal se realizaron con el paquete estadístico profesional SPSS Statistic, versión 1.0 sobre Microsoft Windows. Las relaciones entre las variables agrometeorológicas y los contenidos de K se obtuvieron por análisis multivariado, mediante sistemas computarizados, con análisis de componentes principales y correspondencias múltiples, de acuerdo con el paquete estadístico STATITCF, versión 4, de procedencia francesa.

3.5. Análisis económico.

Para realizar este análisis se tuvieron en cuenta los precios de la papa y maíz en el año 1994, así como del fertilizante potásico (KCl), ya que el resto de los factores económicos no tienen variación con la supresión de la fertilización potásica.

4.0- RESULTADOS Y DISCUSION.

4.1. Respuesta de la papa a la fertilización potásica.

4.1.1. Rendimientos y producción de masa seca.

Rendimientos.

Los rendimientos obtenidos en los cuatro experimentos desarrollados, oscilan alrededor de 20 t/ha con una media de 21,7, similares o superiores al promedio de la provincia de Ciego de Avila y Cuba (tabla 3). No se presentó, en general, respuesta del cultivo a la fertilización potásica, incluso con el empleo de más de 400 kg de K_2O /ha. En la 2^{da}. Y 5^{ta}. campañas del experimento 4, cosechadas a los 70 días, se obtuvieron resultados similares, mediando entre ellos un año sin la aplicación de fertilizante potásico. Al agregar potasio al cabo de dos años (Experimento 3) y cuatro años (Experimento 4) se observa un efecto favorable sobre el rendimiento, aunque no significativo estadísticamente. En la tabla 4 se muestran resultados obtenidos en los experimentos de extensiones en condiciones de producción, que corroboran los alcanzados en estos experimentos de campo, ya que el potasio no constituyó una limitante para tener rendimientos adecuados que fueron, incluso, superiores cuando no se agregó potasio. En todos los casos el contenido de K cambiante en el suelo fue superior a 16 cg/kg y no se ha observado respuesta sobre los rendimientos del cultivo, lo cual coincide con Batista (1979), Valdés et.al. (1979), Guerra (1980) y Deroncelé y Guerra (1982), que sobre suelos Ferralíticos rojos con contenidos de K cambiante superiores a 12 cg/kg y rendimientos entre 20 y 30 t/ha, no encontraron respuesta de este cultivo a la aplicación de dosis máximas de 180 a 500 kg de K_2O /ha. En los suelos Ferralíticos rojos de la U.C.T. Tomás Roig donde se desarrollaron los cuatro experimentos de este trabajo y con rendimientos superiores, o sea de 30 o más t/ha, García y Herrera (1987), Rodríguez y Herrera (1987) y Pupo et.al. (1988) no obtuvieron influencia de la fertilización potásica en los rendimientos de papa. Esto refuerza la idea de que en estas condiciones no hay respuesta a esta fertilización incluso cuando los rendimientos son superiores a 20 t/ha. Tremols (1978) encontró un índice crítico de K cambiante en el suelo para la papa de 11 cg/kg, que indica que si los niveles son superiores a 11, la planta se desarrolla adecuadamente, sin recibir fertilizante potásico. Fundora et.al.(1992) reportaron para un estudio en macetas un índice crítico de 12,3 cg/kg y en el campo uno de 13, los cuales incluyen el indicado por Tremols. La fertilización magnésica no tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento ni en el primer año de aplicado, ni con su uso residual durante la tercera campaña de papa, indicando que los contenidos de Mg cambiante y sus relaciones con el Ca y K en el suelo son adecuados o se mueven en valores que no afectan el cultivo. Las relaciones $(Ca + Mg)/K$ (tabla 5) oscilan entre 6,45 y 13,89 sin agregar Mg y entre 7,95 y 18,09 luego de la aplicación de este elemento. La fertilización potásica y la extracción de este elemento por los cultivos hizo cambiar sus valores, como era de esperar para una aplicación reciente, pero al agregarse magnesio se observó un aumento de las mismas.

Beliaev (1976 y 1978) encontró afectación del Mg al rendimiento en la primera cosecha de papa, pero efecto favorable en las posteriores. Giroux (1989) no encontró efecto de la fertilización magnésica en el tamaño de los tubérculos, absorción de K, Ca y Mg, gravedad específica, masa seca y color de los tubérculos en cuatro experimentos de campo. Cuando los suelos tienen bajos contenidos de K o desequilibrio catiónico los resultados pudieran ser diferentes. Sin embargo Enríquez et.al. (1989), al crear diferentes relaciones Mg / K y $(Ca+Mg)/K$ desde menos de 1 hasta más de 50 no encontraron respuestas constantes ni consistentes en rendimiento, a estas variaciones. Por otra parte Fundora et.al.(1988 b) citan autores que consideran la relación $(Ca + Mg)/K > 100$ como índice de alta probabilidad de respuesta a la fertilización potásica, lo cual justifica la no influencia de éstos iones en los experimentos desarrollados en este trabajo, con relaciones inferiores.

Masa seca.

La producción de masa seca tuvo un comportamiento similar al de la masa fresca (tabla 6), no respondiendo, en general, a la fertilización potásica. En el experimento 2, para la dosis más elevada se observó un mayor desarrollo del cultivo a los 60 días, superior significativamente al resto, sin embargo no se tradujo en un incremento significativo del rendimiento (tabla 3) ni del porcentaje y masa seca de los tubérculos cosechados (tablas 7 y 8). A pesar de ser éste el experimento que produjo mayor cantidad de masa seca, no fue el de mayor porcentaje de la misma, por tanto el incremento del rendimiento, ya analizado, se debió a elevarse, con la fertilización, el contenido de agua de los tubérculos. Según Van der Zaag (1973), con 3 t/ha de masa seca

total en el momento de máximo follaje, es suficiente para obtener buenos rendimientos. En todos los casos se han encontrado valores que se corresponden con éste, como promedios 4,2; 6,1; 4,1 y 4,4 t/ha en los experimentos del 1 al 4, respectivamente. Los porcentajes de masa seca de los tubérculos cosechados oscilan entre 12 y 18%, aunque en su mayoría fueron entre 17 y 18% (tabla 7). La nueva fertilización potásica en los experimentos 3 y 4 al cabo de dos y cuatro años respectivamente, aunque favoreció los rendimientos, no lo hizo con los porcentajes de masa seca, lo que coincide con lo explicado anteriormente. El potasio provocó un efecto positivo sobre el régimen hídrico de las plantas, que es una de sus principales funciones. La entrada de potasio a las células (acentuada cuando hubo consumo de lujo) ocasionó un aumento de su presión osmótica, lo que favoreció la entrada de agua y la turgencia de las mismas (esto es válido también para las células de los tubérculos). La fertilización magnésica no influyó significativamente en la producción de masa seca ni en los rendimientos.

El maíz sembrado entre cada campaña de papa, usando el efecto residual de la fertilización potásica a dicho cultivo, se cosechó seco y los rendimientos fueron de alrededor de 7 t de granos/ha, con independencia de las dosis iniciales de potasio.

Evaluando otros índices como masa de mil granos y masa seca, tampoco se encontró respuesta a dicha fertilización.

De los resultados obtenidos en los diferentes experimentos para uno o varios años, se desprende que en los suelos Ferralíticos rojos compactados de Ciego de Avila, con un contenido de K cambiable superior a 16 cg/kg, no debe lograrse, con la fertilización potásica, una elevación de la producción de papa, ni de su porcentaje de masa seca, por ser el nivel del nutriente en el suelo, suficiente para el adecuado desarrollo de estas plantas. Con las cosechas sucesivas y la no aplicación del fertilizante, tampoco se manifestaron influencias sobre el cultivo. Estos resultados indican que las dosis de K que se recomiendan actualmente por el Ministerio de la Agricultura, desde el punto de vista del rendimiento, son excesivas con relación al potasio, el cual no se aprovecha, mientras que el fertilizante hace falta para otros cultivos como el del plátano.

Esto evidencia la necesidad de ajustar la fórmula completa que se utiliza en el cultivo de la papa, o pasar a utilizar portadores sencillos, con lo cual se produciría ahorro del fertilizante potásico.

4.1.2. Exportación de potasio con la cosecha.

Los tubérculos cosechados tuvieron desde 2 a 6 % de K (tabla 9), aunque en la mayoría de los tratamientos estuvo entre 2,77 y 4 %, lo que supera los niveles reportados por Van der Zaag (1973) y Janson (1978) de 1,5 a 2 %. Tremols (1978), Guerra (1980), y Valdés et.al.(1981) obtuvieron resultados coincidentes. La fertilización potásica no tuvo una influencia marcada, en general, sobre este índice, aunque en algunas campañas se observó una tendencia a elevarse, de forma significativa con las dosis, que no se tradujo en una mayor producción de papas. En el experimento 4, al fertilizar de nuevo con potasio, se observó tendencia a elevarse el porcentaje de este elemento en los tubérculos, debido a su existencia en el suelo en forma más asequible. La literatura recoge numerosas investigaciones que han encontrado que la planta absorbe más potasio en la medida en que se eleva su contenido en el suelo.

Puede haberse producido un efecto similar al encontrado por Shahin et.al. (1987) con más absorción en la primera fase del cultivo de alfalfa en macetas, que en la segunda fase debido a que en la primera provenía desde el K intercambiable y en la segunda desde el no intercambiable. Mitsios y Rowel (1989) demostraron que la extracción por las plantas del K cambiable depende de la facilidad de las arcillas para liberar K y de la eficiencia con que una planta pueda reducir esta fracción por debajo de cierto valor crítico.

Enríquez et.al. (1990) consideran que la concentración de K en la planta puede variar entre el nivel de necesidad y el de consumo de lujo, sin tener insuficiencia visible en el crecimiento. Refieren que, en términos generales, la concentración y absorción de K por la planta están, hasta cierto límite, en función directa del potasio disponible, que en estos casos ha sido alto. En la extracción de K por los tubérculos cosechados se obtuvo un resultado similar al referido para la masa seca. Las exportaciones de K (tabla 10) se encuentran en los rangos reportados por la literatura, que son variados y dependientes de los rendimientos y niveles de K en el suelo:

Dinchev (1972), Cooke (1985 a), Yagodin et.al.(1986) y Fundora et.al. (1989). Quémener (1986 a) considera que la exportación de K puede variar más entre años que entre niveles de K aplicados, debido a cambios de temperatura que provoca liberación de potasio a la solución. Las exportaciones de los experimentos a largo plazo disminuyeron con el tiempo, no obstante esto no afectó la producción de tubérculos ni la de su masa seca. Efecto favorable se observó con la nueva aplicación de K en el experimento 4, lo que puede deberse a

que había ido disminuyendo el K en el suelo. Sin embargo la cantidad de K que sale del campo con los tubérculos no presentó una dependencia directa de los contenidos de potasio cambiante iniciales en cada experimento (entre 16 y 30 cg/kg), debido a ser en todos los casos, niveles superiores a los que requiere la papa para su desarrollo. La presencia del fertilizante recién agregado al suelo favoreció en algunos casos la acumulación de K en los tubérculos, debido a presentarse el elemento en forma más asequible, pero esto no ocurrió como regla. Incluso en los testigos y durante varios años, se presentaron valores semejantes a las variantes fertilizadas.

Entonces si en los suelos Ferralíticos rojos compactados hay suficiente cantidad de $K_{\text{lábil}}$, puede producirse consumo de lujo de este nutriente por la planta, pero sin una necesaria dependencia de la dosis de abono potásico aplicado. En estos casos se corrobora el índice crítico para el cultivo de la papa dado por Tremols (1978). La respuesta de la papa a la fertilización potásica puede presentarse cuando el nivel de K en el suelo es insuficiente para su desarrollo. Entonces el abonado lo favorece. En cambio, si las cantidades de potasio son altas (mayores a 11 cg/kg) y adecuadas las relaciones intercations, $[(Ca + Mg)/K]$ entre 6 y 18] la papa no responde a dicha fertilización, y debe cuestionarse la necesidad de abonar. Esto explica los resultados obtenidos en los experimentos de campo sobre suelos Ferralíticos rojos con tenores altos de potasio, en cuanto a rendimientos y producción de masa seca, incluso con valores por encima de las 30 t/ha (García y Herrera, 1987; Rodríguez y Herrera, 1987 y Pupo et.al. 1988). Algo diferente puede suceder con los porcentajes de potasio en las plantas y las exportaciones, ya que la aplicación reciente del mismo al suelo puede favorecer la extracción y el consumo de lujo, aunque no se traduzca en una elevación del rendimiento y calidad de las papas. Un análisis de esta falta de correlación entre la exportación y los niveles de K cambiante se hará al revisar las formas de K en el suelo.

4.2. Régimen de potasio en el suelo.

4.2.1. Cambios del K total y sus fracciones en el suelo.

El hecho de no encontrar respuesta de la papa a la fertilización potásica para uno o varios años con uso residual, impone la necesidad de estudiar los cambios producidos en el suelo y cómo ha podido suplir al cultivo de la cantidad de K necesario para su desarrollo durante uno o varios años. En la tabla 11 se exponen los cambios en las fracciones de K cambiante y liberable con la fertilización y una cosecha de papa. En el experimento 1 el K cambiante se elevó con la dosis para todos los tratamientos, incluyendo el testigo. La extracción del cultivo fue superior a la exportación (tabla 12) y provocó un desplazamiento del equilibrio del K en el suelo hacia las formas más asequibles.

Con la incorporación de los residuos del cultivo al suelo, se incrementó el K cambiante. En el resto de los experimentos este efecto fue menos marcado, posiblemente por ser superior el nivel inicial de esta fracción de K en los mismos. Los restos de cultivos aportan K a la solución del suelo, haciendo posible el desplazamiento del equilibrio entre las diferentes fracciones de K. La participación de otras formas de potasio en este equilibrio dependerá de su existencia en el suelo y de la composición mineralógica del mismo (Mutscher, 1983), pero la fracción adsorbida se pone en equilibrio instantáneamente con la de la solución del suelo (Chevalier, 1971; Fundora y et.al. (1988 b).

En el experimento 2 se observó también elevación del nivel de la fracción cambiante, en este caso, para dosis superiores a 75 kg/ha. Sin embargo, de acuerdo con el balance agrícola (tabla 13) la exportación fue superior a la fertilización, para dosis inferiores a 240 kg/ha (Experimento. 1) y 225 kg/ha (Experimento. 2). De aquí se infiere que la reposición de potasio por los restos de cultivo, el posible desplazamiento del equilibrio u otra causa, no ocurrió sólo en el testigo del experimento 1, sino en todos los tratamientos. Sólo el empleo de 240 y 225 kg/ha pudieron dejar en el suelo parte del K aplicado, pero los incrementos debieran haber sido de 0,4 y 1,5 cg/kg y no de 6,5 y 10,8 cg/kg, como se observa en la tabla 11. Por tanto se debe tener en cuenta otros factores que pueden contribuir a la reposición del K en el suelo.

En el experimento 3 la fertilización de nuevo elevó el contenido de K cambiante en todos los tratamientos, excepto con 60 kg/ha (gráfico 2), donde esta fertilización fue inferior a la exportación. Luego de dos cosechas de papa y maíz, aún los tratamientos que recibían más K, tienen niveles ligeramente superiores del K cambiante, aunque inferiores a los tenores logrados con la fertilización. Los tratamientos 0 y 60 kg/ha tenían, en ese momento, menos K cambiante que al inicio del experimento, sin embargo con el resto de las dosis se ha alcanzó el nivel inicial. Si analizamos la tabla 13 vemos que con 120 kg/ha se reportó un balance negativo para una campaña y por tanto el nivel de K cambiante debería ser inferior al inicial, lo cual no ocurrió (gráfico

2). Esta situación es similar a la ya analizada para los experimentos 1 y 2 y ratifica la importancia que tiene en la dinámica del K en estos suelos, la acción del cultivo, que puede ejercer, incluso, mayor influencia que el posible lavado. Kuchenbuch (1988) demostró que la planta por sí misma es un factor importante en la disponibilidad de K. Los valores de K cambiante son a veces superiores en el tercer muestreo a los dos anteriores, lo cual puede deberse a la incorporación de los restos de cultivos y al momento de toma de la muestra. Quémener (1986 a) encontró que el K intercambiable variaba con la época de muestreo debido a la incorporación de los residuos de cosechas, además de los factores climáticos, en dependencia del tiempo que medie entre la incorporación de los mismos al suelo y la toma de muestras.

Además considera importante la intensidad y distribución de las lluvias, que puede ocasionar lavados variables. Los experimentos del 1 al 4, se desarrollaron en períodos secos o normales, aunque el cultivo recibió la norma de riego establecida para su desarrollo. En ausencia de lluvias intensas aumentan las posibilidades de elevación capilar desde la profundidad del perfil. Los efectos del clima se analizarán posteriormente.

Un muestreo de los cambios ocurridos a corto plazo puede indicar variaciones estacionales, no detectadas a mediano o largo plazo.

En los tres experimentos referidos, el K cambiante se ha elevado con la fertilización, aunque los incrementos han sido superiores a los esperados por esta vía, lo que hace necesario el estudio de otros factores que influyan sobre esta fracción y analizar el comportamiento e influencia de otras fracciones, los que serán tratados posteriormente. El conocimiento de las variaciones estacionales nos indica, además, la necesidad de tener en cuenta el momento de muestreo como factor cuando se quieren realizar estudios en el suelo a partir de los cambios en el K cambiante. En el gráfico 4 se observa como tendencia, que los muestreos realizados en abril (números pares), luego de las cosechas de papa, corresponden a valores superiores de K cambiante. En esto puede haber influido la menor cantidad de lluvias precedentes a dicho muestreo.

Los cambios en el K liberable para una campaña (tabla 11) son similares a los referidos para el K cambiante. Este hecho indica que esta fracción participa en el equilibrio dinámico del K en el suelo a corto plazo.

El estudio de los cambios de las diferentes fracciones de K en el suelo con la fertilización y cinco cosechas de papa y maíz (experimento 4), se muestran en los gráficos 3, 4 y 5. Se observa una influencia del momento de muestreo en los contenidos de K cambiante y liberable. En el 1er. año el K acuoso soluble decreció sólo en el testigo (gráfico.3), en el resto se observó influencia de la fertilización, aunque dicha fracción de K es muy cambiante, debido a ser la más móvil del equilibrio de este elemento en el suelo (Grimme et.al.1978).

Los valores de K acuoso soluble son del orden de los reportados en la literatura por Chevalier (1971), Fundora (1980), Fassbender (1987), Fundora et.al.(1988 b) y Barrios (1988), entre 0,5 y 20 mg/L, aunque por no existir un método universal para este análisis, las comparaciones no resultan totalmente precisas.

Para el K cambiante se presentó este efecto de la fertilización en el primer año a partir de 240 kg/ha y en el K estructural liberable, luego de 320 kg/ha. En esto hay que tener en cuenta que como el primer muestreo se hace después de la fertilización y transcurrida una cosecha de papa, incluye tanto los aportes como la exportación del cultivo, por tanto no podemos conocer exactamente el efecto de la primera fertilización sobre los niveles de estas fracciones. Los valores del K estructural liberable para los diferentes experimentos aparecen en la tabla 14 y oscilan entre 5 y 24 cg/kg, niveles bajos según los índices dados por Págel (1972), citados por Fundora et.al. (1988 b).

Rubio (1982) reportó valores entre 0 y 18 cg/kg para los suelos Ferralíticos rojos, con lo cual coinciden estos resultados. Si se observa la tabla 13 puede verse que para las dosis superiores a 160 kg/ha, el balance fue positivo en el primer año. Esto es, el K agregado al suelo superó la exportación de la primera cosecha.

Esto se corresponde con los resultados obtenidos para el K cambiante (gráfico 4), aunque el K liberable se elevó más de lo que debiera ser si fuese sólo la fertilización la causa de ello.

Las variaciones del K cambiante en los tratamientos testigo y 320 kg/ha (luego de su aplicación), durante 30 decenas, se exponen en el gráfico 4.1. De forma similar a los muestreos semestrales, se observan variaciones estacionales, pero más pronunciadas para el tratamiento fertilizado, lo cual es lógico, ya que los contenidos de K cambiante son superiores por el aporte reciente del fertilizante y los iones K^+ pueden recibir mayor influencia del medio exterior en su movimiento. Puede notarse que si los análisis se hubiesen realizado al inicio y cada seis meses, los cambios hubieran sido menos perceptibles.

Por tanto en la medida que el intervalo del monitoreo es menor, es más probable la detección de la influencia del momento de muestreo en los contenidos de K cambiante.

En las tablas 15 y 16 se muestran los contenidos de K cambiante y liberable existentes hasta un metro de profundidad del perfil, antes del inicio del exp.4 y luego de la 1ra. y 5ta. campañas de papa y maíz,

respectivamente. De acuerdo con estos resultados el nivel de K cambiable es superior a 11 cg/kg (índice crítico para la papa, según Tremols,1978) hasta los 40 cm en todos los muestreos , lo que justifica el adecuado desarrollo del cultivo, aun sin fertilización inicial.

Hacia las profundidades los contenidos de K son inferiores y disminuyen con los cultivos continuos, sobre todo en el testigo, pero están atenuados en el tratamiento de máxima fertilización.

El potasio liberable tiene un comportamiento similar al K cambiable en la profundidad y con el tiempo, aunque su disminución, con respecto al inicio, está más atenuada con la fertilización que la fracción cambiable. Esto puede indicar que su participación en el equilibrio de K del suelo es a través del K cambiable, por lo cual este último se consume en mayor medida y el liberable es una de sus reservas. Diversos autores han encontrado ejemplos de este equilibrio entre las fracciones de K en el suelo y de su desplazamiento por cambios en el contenido del elemento en la solución del mismo. No obstante el K liberable no es considerado por éstos como una fracción independiente, sino que adquiere sentido sólo en los análisis químicos de suelos, cuando son tratados con ácidos fuertes, pues es allí donde se produce la diferenciación entre los cationes que sustituyen al K en el sistema coloidal o son liberados de las arcillas (Etchever,1981). El K liberable puede considerarse formando parte del K intercambiable (Yagodin et.al.,1986; Fassbender,1987; Fundora et.al.(1988 b) para los suelos donde existe predominio de arcillas 1:1, que no son fijadores de potasio. En estos casos podrían distinguirse dos tipos diferentes de K intercambiable, los que son cambiados por amonio (de características similares al potasio) y los que se cambian con H_3O^+ (de mayor poder desplazante) y a altas temperaturas.

De esta forma la reserva inmediata de K cambiable con NH_4^+ sería el potasio estructural liberable y a la vez éste último pudiera también incrementarse con la fertilización a corto plazo.

El potasio total (gráfico 6), ha decrecido gradualmente con los cultivos y se encontraron contenidos similares en los muestreos realizados para todos los tratamientos. Los niveles son similares a los reportados en la literatura para este tipo de suelos donde predomina la caolinita. Rubio (1982) 110 cg/kg; Cuéllar (1983) 110 cg/kg y Fassbender (1987) entre 3,13 y 8,67 t/ha (aproximadamente 113 y 312 cg/kg). Subba Rao (1984) en muchos tipos de suelos y durante 6 y 8 años, encontró descenso del K total aún con la aplicación de K, el cual resultó insuficiente para mantener el nivel inicial del nutriente.

Haciendo un análisis integral de todas las fracciones vemos que en todos los experimentos analizados el K cambiable ha variado entre 15 y 30 cg/kg, lo que se corresponde con los hallados para este tipo de suelos. En Cuba Fundora et.al (1988 b) reportaron entre 20 y 60 cg/kg , Barrios (1988) entre 15 y 74,9 cg/kg; Fassbender (1987) para América Latina entre 3,12 y 52,3 cg/kg, Ramanathan (1983 a) en la India entre 23 y 460 cg/kg. De cualquier forma los niveles de K intercambiable encontrados indican que el suelo estudiado tiene contenidos de esta fracción alto o muy alto, según los índices reportados en la literatura y propuestos por diferentes investigadores. Por tanto el estado de K en el suelo ha sido adecuado durante el desarrollo de los cuatro experimentos. El K liberable en HNO_3 , considerado por varios autores el mejor índice para cultivos continuos (Sobulo, 1973; Grimme et.al.,1978; Cuéllar ,1983; Sobulo,1987) fluctuó entre 19 y 60 cg/kg y el K estructural liberable entre 5 y 24 cg/kg. En un análisis de K cambiable y estructural liberable a la misma muestra de suelo de los exp. de campo, se hallaron valores de 23 y 15 cg/kg, respectivamente, lo cual se corresponde con los obtenidos en cada uno de los muestreos.

Los cambios de los contenidos de K en el suelo con la fertilización pero en columnas de suelo se muestran en la tabla 17. La fertilización elevó también el contenido de K cambiable, pero este incremento fue superior al equivalente a las dosis recibidas, entre 0,27 y 0,37 cmol/kg. También son mayores a las encontradas en el campo con el uso de las mismas dosis (tabla 18). Esto es lógico si se tienen en cuenta las condiciones controladas de las columnas y además que las dosis fueron calculadas para toda la masa de suelo de las mismas, pero también hace pensar que el estado de humedad que se mantuvo en ellas, aceleró el desplazamiento del equilibrio desde otras formas hacia la cambiable, o sea, hubo un incremento desde las reservas, lo cual coincide con Johnston (1986). Cuando el suelo recibió una norma de agua 2,3 veces mayor a la del cultivo de la papa (tabla 19), los niveles de K cambiable en las columnas fueron menores para dosis de 320 kg/ha que cuando se usó 160 kg/ha con la otra norma (tabla 17) y similares que en las condiciones de campo (tabla 18). Esto se debe al mayor movimiento del potasio con el agua de riego, lo cual fue comprobado en el análisis de las aguas percoladas. Es notable que la cantidad de agua tuvo mayor influencia que el intervalo de riego usado, ya que iguales normas con diferentes intervalos, produjeron similar efecto (tabla 19). Esto tiene un interés especial cuando se valora la norma de riego del cultivo. En todos los tratamientos fertilizados en columnas fue posible elevar los niveles de K cambiable por encima de un cmol / kg, e incluso a tres, excepto con el empleo de altas normas de riego. Las variaciones estacionales halladas en los contenidos

de K cambiable del experimento 4, pueden estar relacionadas con estos resultados en columnas, ya que un muestreo de suelo precedido de un período lluvioso, puede mostrar menor nivel de K cambiable que en otro seguido de una etapa seca, con menor dependencia de la dosis de fertilizante aplicada. Esto se tratará posteriormente.

El adecuado desarrollo del cultivo durante uno o varios años sin recibir fertilizante potásico se justifica con los niveles de K encontrados en los suelos Ferralíticos rojos compactados, sobre los que se ha plantado. Las dosis de fertilizante potásico empleadas han facilitado la asequibilidad de K a las plantas y, en algunos casos, han sido suficientes para elevar el nivel de K en el suelo. Pero la falta de respuesta a la fertilización y los altos niveles de K cambiable encontrados hasta 40 cm del perfil, tanto en el testigo como en el tratamiento más fertilizado, sugiere que no es sólo la fertilización el factor influyente en los cambios de K en estos suelos, aunque sí pudiese elevar los niveles de K liberable y preparar al suelo para oponerse a los cambios de K cambiable con las exportaciones sucesivas de los cultivos.

4.2.2. Relaciones del K con otros cationes cambiables.

Estas relaciones se considerarán en experimentos de campo y laboratorio. En el campo en la medida que la fertilización u otro factor elevó el nivel de K cambiable en el suelo, disminuyó el contenido de Ca y Mg cambiables en el complejo de adsorción (gráfico 7), y variaron los porcentajes de K en dicho complejo, siendo superiores en las dosis más altas (tabla 20). Esta tendencia se mantuvo en los dos primeros muestreos. A partir del tercero los valores tendieron a igualarse, al igual que sucedió con el K cambiable. Estos porcentajes de K superiores a 2,3 indican un buen abastecimiento del elemento en el suelo (Fundora et.al., 1988 b). También pudo observarse en cada tratamiento la disminución de los porcentajes de K en el transcurso de las cosechas, pero en todos los casos fueron de 4 a 7 % del valor T y de 6 a 13 % del valor S del suelo. Esto indica que la fertilización potásica usada en el campo no influyó negativamente en la composición catiónica del C.A.S. Los resultados obtenidos en el laboratorio al hacer pasar por columnas de suelo soluciones de NH_4Ac o KCl , se exponen a continuación. Las mayores cantidades de K, Ca y Mg lixiviados en cada una de las muestras colectadas cuando pasó por la columna la solución de NH_4Ac (tabla 21) salieron en las primeras 5 muestras (300 mL), alrededor de 7,5 cmol/kg que representa el 50,7 % del valor T del suelo y el 89 % del total de cationes colectados en los 9 muestreos. Yagodin et.al.(1986) encontraron al tratar el suelo con solución de NH_4Cl , que las primeras porciones de Ca intercambiable fueron desplazadas rápidamente y las últimas muy despacio; del 80 al 85 % de la suma de cationes intercambiables era desplazado con relativa facilidad, mientras que el resto era fuertemente retenido. En este caso cuando pasaron 500 mL se recogieron 8,39 cmol/kg de cationes, que representa el 57 % del valor T. El K desplazado corresponde al 5,9 %, el Ca al 34,7% y el Mg al 16,5% del valor T. Esto indica que aún están retenidos alrededor del 43 % de la C.I.C. (ya que estos cationes representen la mayor cantidad entre los que están adsorbidos en el coloide). Esto se debe a que todos los iones cambiables no están retenidos con igual fuerza por el sistema coloidal, en dependencia de la cercanía con que se encuentren dichos cationes de sus cargas negativas, o sea, si están en la parte interior (formada por iones parcial o totalmente deshidratados, que se adsorben de modo específico) o exterior (constituida por iones hidratados que no manifiestan una adsorción específica tan intensa) (Schukin et.al.,1988).

Cuando posteriormente al desplazamiento, se hizo la extracción del suelo con NH_4Ac , se encontraron los resultados que se muestran en la tabla 22. Se observa que el K^+ fue el catión más desplazado y que el Ca^{2+} y Mg^{2+} lo fueron en proporciones similares entre sí (73 %). Cuando sólo quedó adsorbido el 1,5 % del K^+ , todavía el 27% del Ca^{2+} y Mg^{2+} permanecían en la columna. Esto se debe a la diferencia entre sus potenciales iónicos. El K^+ estará más hidratado y será menos fuertemente retenido por los coloides del suelo (Yagodin et.al., 1986). El 76 % del valor T del suelo ha sido desplazado por el NH_4^+ , ya sea por agitación o por desplazamiento, pero aún aproximadamente existe el 24 % retenido en los coloides.

El fraccionamiento del K antes y después de pasar la solución de amonio, se encuentra en la tabla 23. El ion amonio sustituyó al 97,7 % del K cambiable. A pesar de que el resto de las fracciones presentan cambios mucho menores, hay variaciones en ellas entre el 6 y 10 %, lo cual puede indicar que una pequeña parte de éstas pueda intercambiarse con los iones amonio y pudiera hacerlo, en mayor medida, con otros cationes de mayor potencial iónico. Aunque exista un equilibrio entre las soluciones interior y exterior del suelo, los cationes K^+ que forman la fracción estructural liberable en estos suelos (cambiados por H_3O^+) se encuentran más cerca de la superficie del núcleo y por ende están más fuertemente retenidos por las cargas negativas y más difícilmente intercambiables. La cantidad de cationes potasio desplazados de la columna fue superior a la

obtenida por agitación con la misma solución de amonio, como era de esperarse, debido a que es un sistema abierto, donde algunos iones se desplazan definitivamente y no establecen equilibrio con los retenidos, como sucede cuando se emplea la agitación como vía de extracción. No obstante los valores difieren poco, lo que denota la efectividad del método.

La acción desplazante del ion potasio puede observarse en la tabla 24. Cuando habían pasado 300 mL (cinco muestras) habían salido 0,6 cmol más de Ca y 0,28 cmol más de Mg, a pesar de haber agregado 10 veces menos cmol de K^+ que de NH_4^+ (por diferencia de concentraciones). Esto nos indica que el potasio presentó mayor poder desplazante, debido a que su potencial iónico (7,5) es superior al del amonio (6,7). Esta acción fue más marcada desde las primeras porciones de soluciones colectadas. Esto puede observarse también en la tabla 25, donde aparece que el 86 % del valor T ha sido sustituido por el K^+ , ya sea por agitación o desplazamiento. Al hacer el análisis del potasio cambiante y liberable residuales en la columna (tabla 26), se encontró que la cantidad cambiante se elevó en un cmol y la liberable lo hizo en 10 cmol. Esto indica que el K^+ ocupó, no sólo los sitios de cambio más externos del sistema coloidal, sino también los menos cambiables (no cambiables con NH_4^+ y sí con H_3O^+). En esto ha influido la alta $c(K)$ utilizada, que eleva su acción desplazante. Las relaciones de Ca y Mg cambiables que permanecen adsorbidas de forma cambiante antes y al final de este experimento, se muestran en la tabla 27. Antes de agregar potasio las relaciones son adecuadas. Enríquez et.al.(1989) reportan rangos Mg / K entre 1 y 8; Ca/K entre 2 y 17 y (Ca + Mg)/K entre 2,2 y 23,5 para suelos de Costa Rica y también se corrobora con los resultados de los experimentos de campo del presente trabajo.

Luego de pasar la solución potásica por las columnas, estas relaciones están fuera de los rangos óptimos y pudiera ser lo que ocurra en un suelo cuando se fertiliza con dosis muy altas de fertilizante potásico, lo cual es necesario tener en cuenta. No obstante ninguna de las utilizadas en los experimentos de campo del 1 al 4 fueron suficientemente altas como para provocar este desplazamiento de cationes, que afecte el equilibrio. Pero lo más importante de este resultado es haber comprobado la posibilidad favorable de que con la fertilización se cree una reserva del K cambiante (liberable), que actúe como su repuesto durante el desarrollo de los cultivos y esto ayuda a explicar por qué en los suelos Ferralíticos se mantiene alto el K cambiante a pesar de los cultivos e incluso de la ausencia de fertilizante potásico, por un tiempo dado.

Cuando se puso en contacto el suelo por agitación, con soluciones de diferentes porcentajes de K y Ca y tres valores de (Ca + K), se obtuvieron los resultados que se muestran en el gráfico 8. En general puede verse que las adsorciones de K^+ y Ca^{2+} se elevaron cuando se incrementaron los porcentajes de K y Ca, respectivamente. De acuerdo con las leyes de adsorción físico - químicas, la cantidad de cationes desplazados por un ion dado aumenta con el crecimiento de la cantidad del mismo en dicha disolución (Yagodin et.al.,1986). El Ca^{2+} fue mejor desplazante del Mg^{2+} que el K^+ , lo cual se debe a su mayor potencial iónico. Las magnitudes de calcio desorbidas fueron superiores a las de potasio, por encontrarse en mayor proporción en el complejo de adsorción. El aumento de la concentración total de la solución extractiva favoreció más la adsorción de potasio, lo cual era de esperar, de acuerdo con las leyes de adsorción físico - químicas.

Concentración total de 15 cmol/kg. Esta solución contenía tantos cmol/kg como la capacidad de adsorción del suelo, por tanto se estableció un equilibrio suelo \leftrightarrow solución que trajo como consecuencia la desorción de Mg y la adsorción o desorción de Ca y K, en dependencia del porcentaje de ellos en la solución extractiva. Sólo se produjo adsorción de potasio cuando el porcentaje de K > 80 (lo que equivale a agregar 12 a 13,5 cmol de K/kg). Se produjo adsorción de calcio cuando el porcentaje de Ca >60 (lo que equivale a agregar 9 a 12 cmol de Ca/kg) (tabla 28). Para lograr un 5 % de adsorción de K se necesitaron 13,5 cmol/kg, mientras que similar resultado, pero para el Ca, se logró cuando habían 9 mmol de Ca. Cuando agregamos 12 cmol/kg de K se adsorbió el 2,2 %, mientras que con la misma cantidad de Ca se adsorbió el 22 %, o sea, 10 veces más. Esto corrobora que el calcio fue adsorbido con preferencia por los coloides del suelo. La cantidad total máxima adsorbida fue de 5,5 cmol/kg para 90 % de K y 10 % de Ca en la solución extractiva.

Concentración total 30 cmol/kg. Esta solución contiene el doble de cmol/kg que la C.I.C. y con ella se produjo siempre adsorción de K, pero de calcio sólo cuando el porcentaje de Ca > 50 (15 cmol/kg) (tabla 29). Las cantidades y los porcentajes de K adsorbido fueron superiores a las de calcio, debido al incremento de la concentración total de la solución. La cantidad total máxima adsorbida de ambos cationes fue de 6,74 cmol/kg, alrededor de 1 mmol más, a pesar de elevarse el doble la concentración de la solución extractiva.

Concentración total 100 cmol/kg. Cuando agitamos el suelo con solución de concentración 6,7 veces mayor que la C.I.C., se produjo adsorción de potasio, pero sólo se adsorbió Ca cuando el porcentaje de Ca > 50 (tabla 30). No se observó una tendencia clara para la adsorción del Ca y K, aunque sí se retuvo con

preferencia el ion monovalente (Yagodin et al., 1986). A pesar de elevarse tanto la concentración catiónica de la solución extractiva, sólo se tradujo en una adsorción superior de 8,5 cmol/kg.

Otras extracciones. Cuando se agitó este suelo con soluciones de concentraciones crecientes de potasio y sin calcio, se obtuvieron los resultados que aparecen en la tabla 31. Con sólo 0,5 cmol/kg de K, se obtuvo un 22% de adsorción (0,11 cmol/kg). Sin embargo para lograr ese porcentaje, agregando calcio, se necesitaron más de 6 cmol/kg y 30 ó 100 cmol totales (tablas 29 y 30). En las condiciones en que se desarrollaron las isotermas, con 50 cmol/kg de Ca en todas las soluciones extractivas, se necesitaron 1,48 cmol/kg para obtener adsorción (0,06 cmol/kg que es igual a 3,9 %, tabla 31). Esto es lógico, ya que el Ca^{2+} compite con el K^+ por los sitios de sorción y mientras mayor proporción de Ca haya en la solución extractiva, menos posibilidades de adsorción del K^+ .

De acuerdo con todos estos resultados se observa que la preferencia del suelo por adsorber calcio se puso de manifiesto sólo cuando la concentración de la solución extractiva era cercana a la C.I.C. Cuando fue mucho mayor se adsorbió más K que Ca, por ser un ion monovalente. La cantidad total de (Ca + Mg) adsorbido fue de alrededor de 5, 7 y 8 cmol/kg para 15, 30 y 100 cmol/kg, respectivamente, valores inferiores a T del suelo, que nos muestra que hay una parte del C.A.S. que no se satura con estos iones, aunque estén en altas concentraciones. La máxima adsorción lograda para el K+ fue de 8,5 cmol/kg (con desorción de Calcio) y la de calcio fue de 5,4 cmol/kg, lo que daría como resultado la existencia de 9 y 10 cmol/kg de K y Ca, respectivamente en el C.A.S., niveles que se acercan al valor S del suelo y se corresponden con los resultados discutidos en las tablas 22 y 25.

Todo esto indica que es posible obtener un mayor nivel de potasio en este suelo que el ya existente en ellos, pero las cantidades de potasio a agregar y las condiciones que se necesitarían no se dan en el cultivo de la papa, ya que las dosis de fertilizantes usados están por debajo de éstas. Incluso sin agregar calcio, habría que usar altas cantidades de potasio.

No obstante cuando se cultiva la papa en zonas de bajos contenidos de fósforo, se hace necesario el empleo de altas dosis de este fertilizante, lo que implica la adición de calcio al suelo en cantidades apreciables. Si se fertiliza en dos momentos dados con igual relación intercатиónica, la adsorción de K dependerá de la concentración catiónica total. Para las dosis de K y Ca (como superfosfato) usadas en el experimento 4, la suma (Ca + K) < 15 y se adsorbe Ca con preferencia, pero para las dosis que se usan en el plátano, que es un cultivo que ha rotado con la papa en producción, la suma (Ca + K) = 44, por tanto se adsorbe K preferentemente y pueden crearse desequilibrios catiónicos inadecuados para el cultivo.

4.2.3. Transformaciones del potasio en el suelo.

En el gráfico 9 se muestran los cambios producidos en cada una de las fracciones de potasio con la fertilización inicial y las cosechas sucesivas del experimento 4. En la tabla 32 aparecen los porcentajes de cada una de estas fracciones con respecto al K total. Además del K cambiante y liberable, existe la fracción de K que actúa como reserva, que constituye el mayor porcentaje en cada uno de los muestreos. El K cambiante representa entre el 9 y 20 % del K total, valor que consideran Fundora et al. (1988 b) representativo de los trópicos (1 y 50 %). No se encuentra una tendencia a valores superiores en los tratamientos más fertilizados. El K liberable representó entre el 4 y el 16%. En un análisis conjunto puede observarse que la fracción de K cambiante tiende a reponerse, manteniendo un nivel alrededor de 20 cg/kg, sobre todo en la medida que se desarrollaron las cosechas sucesivas. El K liberable manifiesta cambios con valores entre el 11 y 25 cg/kg. Sin embargo la fracción de K de reserva disminuye con el tiempo, al igual que el K total.

Variaciones en el K cambiante están relacionadas con el resto de las fracciones. El suelo tiende a mantener un nivel constante de K cambiante a expensas del liberable y éste del K de reserva, por lo que este último se agota, poniéndose en peligro las posibilidades del suelo de satisfacer la nutrición potásica, si no recibe, en el momento necesario, aportes adicionales de potasio. Si tenemos en cuenta que la dinámica del K en estos suelos más meteorizados, es diferente a la de aquellos donde participan arcillas 2:1 donde parte de la reserva de K permanece muchas veces fijada en dichas arcillas, habría que pensar en lo que debiera considerarse para estos suelos Ferralíticos, como concepto, K de reserva y dónde se localiza. Boyer (1973) propuso distinguir tres categorías de K disponible, la cambiante y la rápida y lentamente liberables.

Pero en estos casos la velocidad de liberación de estas fracciones de K no ha sido tan lenta, pues ha permitido, en un corto plazo la reposición de la fracción cambiante. Entonces este poder de regeneración puede variar de acuerdo con el tipo de suelo. Según Yagodin et al. (1986), en los suelos caoliníticos estas reacciones de intercambio son más rápidas porque ocurren en la superficie de las partículas. Sparks (1986) encontró

feldespatos altamente meteorizados en la fracción de arena, el cual servía de reserva a las fracciones más móviles.

Debido a esto Quémener (1986 a) sugiere no despreciar esta fracción en los análisis de suelo. Fundora et.al.(1981 a), en un análisis de la composición mineralógica de los suelos Ferralíticos rojos típicos de Cuba, encontraron cantidades de feldespatos alterados en esta fracción que varían desde trazas hasta el 75%, a través de 3 m de los perfiles estudiados. En los análisis de la fracción mineralógica de este suelo, Barrios (1988) despreció la fracción arenosa.

Cabe la posibilidad de que parte del K de reserva encontrado en los análisis de suelo del experimento 4, provenga de una fracción similar, que participe en el equilibrio potásico reponiendo, con el tiempo, parte del K consumido por los cultivos.

4.2.3.1.Fijación.

En el gráfico 10 se muestran los resultados del experimento de laboratorio para estudiar la posible fijación de potasio en este suelo. Nótese que con dosis de K menores que 234 kg/ha no se produjo. Cuando se elevó la dosis se fijaron 34,9 kg/ha, incrementándose a 130 kg/ha con 522 kg/ha de K. A partir de 651,6 kg/ha y hasta 1069,2 kg/ha, tendió a ser entre 223 y 259 (6,2 y 7,2 cg/kg) con una media de 236,2 (6,56 cg/kg).

En los experimentos de campo se han utilizado algunas dosis que están cerca o rebasan los 234 y, por tanto, pueden haberse producido fijaciones de potasio. Pero en todo caso los niveles son inferiores a los 130 kg/ha (3,6 cg/kg) fijados. Teniendo en cuenta las condiciones reales del campo, en que no se produce un contacto suelo - fertilizante igual al de la incubación en el laboratorio, puede considerarse que la fijación no debe haber sido un factor determinante en la dinámica del potasio en el suelo en los experimentos de campo

No obstante nos informa de la posible existencia de restos de una fracción de arcilla con posibilidades de fijar potasio. Es posible que la caolinita esté impurificada con trazas de vermiculita o montmorillonita, no detectadas en los análisis de suelos realizadas por Barrios (1988), aspecto que explicaría la alta selectividad de esta arcilla por el potasio. Esta idea puede reforzarse si analizamos las características del suelo estudiado de alto valor V (67,35) y pH = 6,17 que puede indicar que su grado de meteorización no es tan alto. (Soto et.al.,1983; Mutscher, 1985). Izquierdo et.al. (1991), estudiando el complejo de adsorción en un grupo de suelos Ferralíticos, entre ellos el compactado, hallaron trazas de montmorillonita y la C.I.C. no correspondió con las encontradas para los minerales del tipo 1:1. Poss et.al. (1993) encontraron un 20% de fijación en suelos caoliníticos, que explicó por la presencia de un 2% de arcillas estratificadas. Sin embargo relacionando estos resultados con los mostrados en la tabla 26, pudiera pensarse que parte del K, aquí detectado como fijado, estuviera retenido con mayor fuerza por los coloides del suelo y que por esta razón aparecería como potasio liberable en los análisis del suelo luego de tratarse con altas concentraciones de este elemento. También podría considerarse que parte del potasio liberable determinado en aquel caso estuvo fijado y que este fenómeno se puso de manifiesto por permanecer el suelo en contacto con esas altas concentraciones de potasio. Por otra parte los resultados de los análisis del K interlaminar a diferentes muestras de suelo, revelaron la existencia de una fracción de 5 cg/kg de K, que sólo se hacía cambiante luego del calcinado el suelo en la mufla (tabla 33), y esto apoya la idea de la existencia de K fijado, liberados por los alternos humedecimientos y secados. Si comparamos los porcentajes de fijación obtenidos (gráfico 9) con los reportados para este tipo de suelos por Bajwa (1981) del 15 % y Fassbender (1987) del 6 %, observamos que son superiores, lo cual refuerza la idea tratada anteriormente. Sin embargo Brunet y Granda (1976) y Treto (1977) [citados por Fundora et.al.(1988 b)] no encontraron fijación, lo cual no contradice estos resultados, ya que el grado de meteorización de los suelos Ferralíticos rojos puede ser diferente para variadas regiones, en consecuencia con lo que reflejan los resultados de Fundora et.al. (1981a).

4.2.3.2. Isotermas de sorción.

Las transformaciones del potasio en el suelo estudiadas a través de las isotermas obtenidas después de la fertilización inicial y las primera, segunda y cuarta cosechas de papa, aparecen en los gráficos 11, 12 y 13.

En todos los casos hubo un buen ajuste a la línea recta, lo cual puede deberse al predominio de minerales caoliníticos en el suelo y, por tanto, la adsorción del potasio en las posiciones planares. Resultados similares han reportado Beckett (1971), Miranda et. al. (1972),

Fassbender (1975), (citados por Rubio, 1982), Fundora (1979) (citado por Fundora et.al.(1988 b) Navarro y Torres (1980), Navarro y Valdés (1982) y Rubio (1982). En Cuba Baisre (1978), Obregón (1979) y Camacho y Paulin (1983) han encontrado presencia de minerales del tipo 1:1 y óxidos e hidróxidos de hierro en estudios mineralógicos de suelos Ferralíticos rojos. Barrios (1988) encontró presencia de caolinita en suelos de Ciego de Avila. Sin embargo Fundora et.al.(1981 a) en estos suelos reportaron trazas de feldespatos en la fracción ligera y entre el 5 y 10 % de otros fragmentos arcillosos, e Izquierdo et.al.(1991) encontraron a partir de los 100 cm del perfil trazas de montmorillonita. Esto reafirma que, aunque la arcilla predominante es la caolinita, otras, aunque en mucha menor proporción, pudieran estar participando en la dinámica del potasio en este suelo.

Cambios debidos a la fertilización y una campaña de papa. La fertilización elevó $c(K)_0$, debidas al equilibrio logrado cuando no hay adsorción ni desorción de potasio. Esto coincide con los incrementos del K cambiante logrados por dicha fertilización (tabla 34). El hecho de que las $c(K)_0$ sean superiores al K cambiante con NH_4^+ detectado en esa muestra de suelo puede indicar las posibilidades de elevar el nivel de esta fracción en el suelo con el uso, por ejemplo, de dosis potásicas superiores, cuando hay mayor superficie de contacto suelo - solución. Cuando se agitó el suelo con soluciones de concentraciones crecientes de K, éste fue saturando hasta alcanzar un equilibrio entre lo que hay adsorbido y la solución. Estos valores de K adsorbido estarían más cercanos a los logrados con la saturación del suelo, que los obtenidos al calcular el K cambiante, que refleja lo que hay en el complejo de adsorción en el momento del muestreo. También en los experimentos en columnas de suelo se han obtenido niveles de K cambiante muy superiores (ya presentados anteriormente). Esto sugiere que las arcillas no han alcanzado en el campo, su índice de saturación potásica, lo cual apoya el poco movimiento del elemento en el perfil. Puede verse en la tabla 26 cómo luego de una dosis alta de K, la fracción cambiante se elevó a más de un cmol/kg, nivel no alcanzado en ningún experimento de campo estudiado. También es posible que en el equilibrio del potasio haya participado otra fracción de potasio.

Cuando se agitaron las muestras de suelo con las soluciones de potasio para hacer las isotermas, sólo se encontró adsorción cuando la $c(K)$ de dicha solución fue superior a 40 mg/L y esta tendencia disminuyó con el aumento de la fertilización potásica en el campo (máxima ΔK en la tabla 31), o sea, cuando el suelo estaba más saturado en K. Según las leyes de adsorción físico químicas, se producirá adsorción sólo cuando la AR^K [en este caso $c(K)$] de la solución sea superior a la $AR_0^K [c(K)_0]$. Esta condición sólo se cumplía en estos casos en que se manifestó adsorción potásica, o sea, en los suelos poco o no fertilizados, cuando las $c(K)$ de las soluciones fueron mayores que 40 mg/L (o 40 cg/kg, de acuerdo con la relación suelo - solución trabajada). Si analizamos la equivalencia de las $c(K)$ con dosis de este fertilizante expresadas como kg/ha de K_2O , vemos que hemos puesto en contacto el suelo con 180 y 1 620 kg/ha y se produjo adsorción con dosis superiores a 1 440 kg/ha, lo que indica que el suelo está bien abastecido en potasio cambiante. Pero también en la tabla 31 se observa la diferencia en el comportamiento del suelo cuando se hace la isoterma sin calcio, ya que con 20 cg/kg (720 kg/ha) se produce adsorción potásica y el uso del Ca, en altas concentraciones, posibilita la adsorción preferencial del ion divalente y por tanto las cantidades necesarias a añadir para lograr adsorción potásica son mayores. Esto pudo

haberse producido en la obtención de las isotermas, por lo cual las dosis para lograr la adsorción fueron tan altas.

También la fertilización aumentó las $(-\Delta K)$ por elevar la cantidad de estos iones en el complejo de adsorción del suelo. Estos niveles crecieron proporcionalmente con las dosis de abono potásico recibidas. Los valores obtenidos oscilan entre 16,2 y 36,47 cg/kg para el testigo y dosis máxima respectivamente, lo que da la idea de la cantidad de potasio que constituye la fracción de más fácil liberación hacia la solución, cuando disminuye la $c(K)$ acuoso soluble. Rubio (1982) reportó valores de este parámetro para suelos Ferralíticos rojos que oscilan entre 0,11 y 1 cmol/kg, y para los de Ciego de Avila, 0,68 cmol/kg, tenores que contienen los encontrados en nuestro experimento. Si observamos los valores de la fracción liberable (tabla 34), vemos que también se encuentran en este rango hallado por Rubio para las ΔK mediante las isotermas.

Las relaciones Q/I , que representan la capacidad del suelo de oponerse a cambios en las $c(K)$ de la solución del mismo, fueron aproximadamente iguales para todos los tratamientos, aunque algo inferiores para las más bajas. Por tanto la cantidad de K que habría que agregar para elevar en 1 mg/L el contenido de K en la solución del suelo, no difiere grandemente, a pesar de haber recibido dosis potásicas diferentes. Esto refuerza la idea de que el potasio se retiene en posiciones planares, fundamentalmente, ya que se libera con relativa facilidad y con menos de 1 mg/L de fertilizante se logra elevar a esta cantidad la $c(K)$ de la solución. Debemos tener en cuenta que si la facilidad para liberarse el K fuera alta, los cambios en los contenidos de K en el suelo, de los experimentos de campo, pudieran ser mayores. Por esto la facilidad es llamada "relativa". Además, de acuerdo con los valores de las $(-\Delta K)$, existe una fracción de 16 y 37 cg/kg que puede reemplazar las $c(K)$ perdidas de la solución del suelo.

Según los estudios realizados por Rubio (1982) para diferentes tipos de suelos de Cuba, usando un grupo de métodos que incluyen las isotermas, los Ferralíticos rojos de Ciego de Avila muestran valores de esos parámetros que difieren de los de su misma clase en otros lugares del País. Aunque en ese trabajo no se valora el porcentaje de arcilla de dichos suelos, se conoce, según Barrios (1988) que para estos suelos es superior al 50%. Este debe ser un factor importante que influye en este comportamiento. Aunque por cada kg de suelo se retengan alrededor de 15 cmol de cationes, entre ellos aproximadamente el 5 % corresponde al potasio, que representa alrededor de 1 000 kg de K por ha. Puede todo esto indicar la posibilidad de fertilización a mediano o largo plazo de un suelo Ferralítico rojo que, aunque no tenga una alta capacidad buffer, por predominio en ellos de la caolinita, tenga un porcentaje de arcilla que pueda adsorber en ellas K, con diferentes energías. Esto implica que el K adsorbido puede detectarse en diferentes fracciones, que pueden actuar unas de reservas de las otras y garantizar por un tiempo el potasio necesario para el desarrollo de la papa.

Isotermas después de dos cosechas de papa. Se observa una tendencia a la disminución de $c(K)_0$ con respecto al muestreo anterior, debido al menor contenido de K en el suelo. Las posibilidades de desorber K $(-\Delta K)$ también decrecieron, resultando más brusco el cambio en los tratamientos más fertilizados, lo cual puede deberse a que en esos casos la fertilidad mostrada era artificial, por el fertilizante agregado y no propia del suelo y en este momento están más cercanas a la natural. (Los valores de K cambiante son similares para todos los tratamientos). El grado en que cambiaron las $c(K)_0$ y las $(-\Delta K)$ no fue igual. Las $(-\Delta K)$

variaron más que las primeras, lo que pudiera deberse a la reposición de K que se ha hecho a la solución del suelo desde las reservas, necesarias para el cultivo. Esto hizo que las relaciones Q/I decrecieran. Esto es, para elevar o mantener constantes las $c(K)$ en la solución del suelo, se requiere adicionar menos potasio cuando el suelo ha repuesto una parte del potasio desde sus reservas de K lábil y esto está en relación con la cantidad de K que se halla adsorbida y con la facilidad con que sea desorbida. La diferencia entre las curvas fue menos marcada, en comparación con las obtenidas después de la primera cosecha (gráfico 12).

Al agitar las muestras de suelo con las soluciones potásicas para la obtención de las isothermas, se produjo adsorción ($-\Delta K$) en todos los tratamientos (máxima ΔK en tabla 34), debido a la existencia de menos potasio en las reservas. Esto indica que en todos los casos la $c(K)_K$ de las soluciones en contacto fueron superiores a las del suelo.

Isothermas después de 4 cosechas de papa. A juzgar por los niveles de K cambiabile encontrados en este muestreo, la riqueza potásica del suelo en este momento había decrecido (tabla 34).

Si embargo el análisis dinámico muestra que las $c(K)_0$ y ($-\Delta K$) son superiores y las relaciones Q/I se mantienen entre 0,3 y 0,5, como en el resto de los casos. Esto puede indicar que el suelo tiene posibilidades de liberar potasio desde sus reservas para mantener un nivel de K cambiabile de alrededor de 20 cg/kg (ya analizado), adecuado para el desarrollo de 5 campañas de papa, como se vio en el experimento 4, donde no se encontraron diferencias entre los tratamientos, en el desarrollo de los cultivos. Los cambios estacionales encontrados en el estudio del fraccionamiento del potasio, también afectaron los parámetros de las isothermas.

Karpinets (1992) determinó la capacidad buffer del suelo, mediante un factor $B = (K_0 - K_1)/K_0$, donde K_0 y K_1 son los valores de K cambiabile determinados en dos análisis seguidos a una misma muestra de suelo. Según su criterio, mientras más cerca esté de la unidad el valor de B, menor será la capacidad buffer. Para el suelo en estudio en este trabajo $B = 0,96$, lo cual podría indicar que no amortigua bien los cambios de K cambiabile, lo que no se corresponde con la práctica. Esto reitera la idea de que existen otras condiciones que dan al suelo poder amortiguador y que no son detectadas fácilmente en análisis de rutina de los suelos.

4.2.3.3. Movimiento del potasio en el suelo.

En el gráfico 14 se muestran los resultados de un experimento en columnas de suelo que permitió profundizar en el movimiento de K debido a la difusión o convección, cuando se fertiliza a diferentes profundidades del perfil y se crean diferentes gradientes de potasio por variadas causas (tratamiento 4 de columnas). Cuando el suelo tenía un nivel de potasio cambiabile de 30 cg/kg y fertilizamos superficialmente (4.1), el K se distribuyó a través de los 40 cm, aunque se observó mayor retención del nutriente en los primeros 20 cm (nivel 1,7 veces mayor). Si el fertilizante se agregó a los 20 cm (4.5), se manifestó una elevación capilar que provocó un contenido en la mitad superior 1,5 veces mayor.

El resultado fue similar a (4.1), elevándose el tenor de K a través de los 40 cm. Si por cualquier causa decreció el contenido de potasio en los primeros 20 cm hasta 10 cg/kg, y fertilizamos a los 20 cm (4.4), el lavado fue similar al ascenso capilar del K y el suelo se enriqueció de 20 a 40 cm. Cuando el contenido de potasio por debajo de 20 cm fue de 10 cg/kg y en la superficie de 30 cg/kg (4.3), el lavado fue 2,5 veces superior al ascenso capilar y el resultado fue una homogenización del nivel de potasio a través de los 40 cm. Si el tenor de K, a través de los 40 cm fue de 10 cg/kg y fertilizamos superficialmente (4.2), el K se distribuyó equitativamente a través de la profundidad, pero cuando la fertilización fue a los 20 cm (4.6), el lavado fue 3 veces mayor al ascenso capilar y se elevó más el contenido de K en los últimos 20 cm de la columna.

En general se observa que el fertilizante se localiza, en mayor grado, alrededor de la posición donde fue situado, logrando tenores superiores a los esperados con las dosis agregadas, debido a que dichas dosis fueron calculadas para todo el volumen de la columna y en realidad el fertilizante no se desplazó totalmente a través de ella. También por las condiciones de humedad en que se mantuvieron las columnas (que favorece el desplazamiento del equilibrio potásico hacia esta fracción), y el potasio que recibió con el agua de riego. McLean (1978) en un experimento con fertilización potásica durante tres años, no encontró evidencias de lixiviación de K por debajo de 30 cm, no obstante elevar las dosis hasta 2 232 kg/ha. También Johnston et.al. (1993) observaron una retención de potasio en los primeros 10 cm en un suelo limo - arenoso y no hubo movimiento por debajo de 23 cm. En general se observó mayor movimiento del K a través del suelo pobre en K, desde las zonas enriquecidas con fertilizante. El traslado del K hacia abajo con el agua de riego y hacia arriba por el ascenso capilar, provocó una tendencia a la homogenización del tenor de K a través de todas las profundidades y valores entre 18 y 57 cg/kg (tabla 35). Arrigo et.al.(1988) hallaron en sus experimentos, que el factor principal de movimiento de potasio fue la difusión, que constituyó el 88,8 % del K extraído por las plantas de maíz. El movimiento de potasio con el agua de riego se produce porque sólo una parte del K aplicado, interacciona con los sitios de sorción y lo hace mientras la AR^K de la solución sea mayor que las AR_0^K del suelo. Cuando se establece el equilibrio catiónico el K fluye "libremente" con el agua de drenaje (Phillips et.al., 1988) y continúa su interacción con el resto de los sitios de sorción. A medida que el suelo sea más rico en K, su AR_0^K es mayor y se produce menor sorción que en el pobre.

De acuerdo con los muestreos a profundidad del experimento 4 (ya referidos en las tablas 15 y 16), es de esperar se hayan producido estos procesos también en el suelo de los experimentos de campo, ya que el contenido de K cambiante en la superficie del testigo, se ha mantenido a un nivel similar al inicial, con una disminución gradual en la profundidad. En el tratamiento más fertilizado los tenores de K cambiante son superiores en todo el perfil, debido al movimiento de potasio con el agua de percolación y por la difusión hacia zonas de menor concentración. En los dos casos ha estado presente el ascenso capilar y ambos procesos han contribuido a la estabilidad de tenores de K en los primeros cm del perfil.

Estos criterios se refuerzan al analizar los resultados del estudio de las variaciones del K cambiante a diferentes profundidades en los muestreos de suelo decenales, que se representan en el gráfico 15. Los niveles más bajos de K se encontraron a las profundidades mayores a 60 cm, que manifestaron cambios sólo después de precipitaciones superiores a 70 mm, como tendencia. En el resto del perfil las mayores variaciones también se observaron con dichas precipitaciones. Es de notar que, luego de caer 74 mm (muestreo 6), los mayores incrementos se encontraron a los 60 cm y después de 183 mm (muestreo 9), el K se movió más allá de dicha profundidad.

También puede observarse que elevaciones de las $c(K)$ en las capas superiores, se han correspondido con disminuciones de estos valores en las capas inferiores precedidos de períodos de sequía. Se ha favorecido el ascenso capilar y la elevación, con ello de las $c(K)$ en las capas superiores del suelo. Deol et.al. (1987) en una rotación maíz - trigo, sin respuesta al fertilizante potásico, incluso después de 13 años, observó un descenso del K no intercambiable en los primeros 15 cm del perfil cuando no aplicó potasio. Tandom et.al. (1989) evaluaron también a esa profundidad, el K cambiante, observando su descenso a pesar de la no respuesta. Consideraron, por esto, que no es posible tener una información completa sobre el poder de suministro de K del suelo, sin analizar el subsuelo y tener en cuenta la fracción no cambiante del K.

Yagodin et.al. (1986) consideran la migración de K sólo considerable en suelos arenosos y arenoso - limosos. Dinchev (1972), en diferentes suelos, con dosis cerca de 400 kg/ha y variados cultivos, reportó movimiento de este elemento hasta los 60 cm. Herrero et.al. (1984) encontraron una retención de más del 90 % en los primeros 30 cm en un experimento en columnas de suelo Ferralítico rojo compactado. También en experimentos de laboratorio Johnston et.al. (1993) hallaron que se retuvo casi todo el K y no hubo lavado por debajo de 60 cm. Por los resultados aquí obtenidos se reafirma la idea de que las pérdidas de K por lavado no son notables y se produce un movimiento de dichos iones ascendente o descendente que tiene como resultado final la permanencia de las mayores cantidades de K en una zona que garantiza la suplencia a las plantas, cuando éstas disminuyen las $c(K)$ adyacentes. Este será un factor importante en el balance de este elemento en estos suelos.

4.2.3.4. Balance del potasio en el suelo.

En las tablas 36, 37 y 38 se muestran los balances de potasio en los experimentos 1, 3 y 4 para uno, dos y cinco años, respectivamente, considerando la fertilización y exportación (balance agrícola, según Ramón et.al., 1991) o teniendo en cuenta los cambios de potasio en el suelo.

Balance agrícola (E). Para un año con exportaciones entre 4 y 6 cg/kg (tablas 36 y 37), este balance fue similar, encontrándose valores positivos para dosis superiores a 300 kg/ha (exp. 3). No se observa una influencia marcada del nivel inicial de K en el suelo, en este balance, como no lo fue en la exportación por el cultivo, lo cual se debe a que todos los casos el suelo posee suficiente potasio, clasificado de alto, según se ha referido anteriormente. Por ejemplo, una misma dosis de 60 kg/ha tuvo similar balance para un nivel de K inicial de 16,5 y 26,4 cg/kg.

También con un nivel de K inicial superior (tabla 38) y exportaciones entre 2 y 3 cg/kg en un año para la papa y 0,7 a 0,8 para el maíz, se encontró balance positivo para las dosis superiores a 160 kg/ha. Si consideramos en el análisis la exportación total de la papa y el maíz en los años desarrollados (D), encontramos valores negativos para cinco años, con niveles entre 6 y 13 cg/kg, o sea para la producción de estos cultivos fue necesaria la entrega de K desde las reservas y profundidades del suelo.

Fundora et.al. (1988 b) reporta autores que encontraron balances (E) de potasio, negativos: Torres et.al.(1980), Rodríguez et.al.(1981), Cuéllar (1983) en suelos Ferralíticos Rojos, en caña de azúcar. También Cooke (1986) lo obtuvo para diferentes rotaciones de cultivos. Ramón et.al. (1991) obtuvieron balance agrícola positivo en un experimento a largo plazo con maíz, sobre un suelo fijador, pero tuvieron que aplicar dosis muy superiores a las cantidades extraídas por las cosechas.

Balance que incluye los cambios de K en el suelo. A pesar de que sólo se obtienen aportes netos de la fertilización al K cambiante con el uso de las dosis más altas de cada experimento (E), si se incluyen los tenores de K cambiante en los momentos de desarrollo de los cultivos, se aprecian siempre valores positivos del balance (F) y más dependientes del contenido inicial de K en el suelo. Si este es inferior a 26 cg/kg, el nivel de K final en el suelo (G) fue superior al esperado, de acuerdo con el balance (F) y, por tanto, el suelo ha cedido potasio de sus reservas para el desarrollo del cultivo en uno ó dos años. Sin embargo cuando la c(K) inicial fue de 30 cg/kg (tabla 38), al finalizar un año, hay menos K que el que debía haber de acuerdo con el balance (F), lo que nos puede indicar que el elemento se ha movido hacia mayores profundidades del perfil o se encuentra formando parte de otra fracción. Al cabo de 5 años, en todos los tratamientos, el suelo ha cedido de sus reservas para el desarrollo de los cultivos (valores negativos de I). Entonces las cantidades de K liberadas por el suelo disminuyeron cuando el nivel inicial fue mayor y con el incremento de las dosis aplicadas. Si tenemos en cuenta el cambio del K total desde el inicio del experimento 4, hasta luego de la 5ta. campaña de maíz, vemos que es superior que la exportación de los cultivos. Por ejemplo en el testigo la disminución del K total fue de 34 cg/kg y la exportación total de alrededor de 14. Ramón y Christman (1989) en experimentos a largo plazo encontraron que los cambios de K cambiante fueron menores que lo que había sido indicado por el balance del nutriente y Arthier et.al. (1990) observaron liberación de 440 kg/ha en el testigo y 100 en la dosis máxima. Brunet (1984) en suelo Ferralítico Rojo compactado cultivado con piña, realizó balance incluyendo otros factores, además de la fertilización y exportación y encontró sólo valor negativo en el testigo. Al incluir el K liberable en el balance, observó liberación desde las reservas del suelo. Chevalier (1971) incluyó en sus balances el contenido de K cambiante y encontró que el mismo variaba con respecto a lo esperado, debido a la fijación o liberación del K desde las reservas, de acuerdo con las dosis utilizadas.

En la tabla 38 se observa que, a pesar de las exportaciones, los niveles de K cambiante en el testigo y dosis menores, se mantienen aproximadamente iguales después de cinco años. Subba Rao (1984) no encontró cambios del K disponible al cabo de seis y ocho campañas y, a partir de los primeros años, observó tendencia a la estabilización de estos valores, por lo que sugirió incluir en estos análisis el K liberable en HNO_3 .

En la tabla 39 se observa que cuando se situaron las columnas dentro del laboratorio (Tratamiento 3), se obtuvieron menores niveles de K cambiable que cuando se colocaron fuera (Tratamiento 1). A la intemperie el sol actuó sobre el suelo evaporando el agua de la parte superior, lo cual favoreció el ascenso capilar y con esto el movimiento hacia arriba del ion K^+ . Sin embargo cuando no actuó el sol la columna se mantuvo a capacidad de campo y el K^+ fue más arrastrado por el agua de riego a través de los poros del suelo y hacia a fuera de la columna. Esto se comprobó en el análisis de las aguas percoladas, las cuales contenían seis veces más K^+ . Otro efecto del sol fue el de elevar la temperatura del suelo, lo cual puede incrementar el K cambiable por el desplazamiento desde otras fracciones. Como el Ca y Mg están retenidos con preferencia en los sitios de sorción más internos, se afectaron menos por el movimiento del agua (no hay incremento en los percolados). Köchl (1988) en experimentos a largo plazo (30 años) consideró ventajoso tener en cuenta el suministro de K desde el subsuelo para analizar el efecto de la fertilización potásica a largo plazo. Nobili (1990) valoró que se ha prestado poca atención al rol del subsuelo en la producción agrícola y lo considera importante sobre todo para los cultivos con raíces largas y densas y cuando hay déficit de humedad y Fotyma and Gosek (1991) sugirieron evaluar la capa de suelo hasta los 40 cm.

También en el balance del potasio juega un papel importante la incidencia de algunas variables agrometeorológicas. En las tablas 40 y 41 se exponen los análisis estadísticos realizados para encontrar las más influyentes en esto. En la tabla 40 aparecen los coeficientes de estas variables y en la tabla 41 los rangos de las mismas que se han correspondido con los diferentes niveles de K en el suelo. Las variables que influyeron de forma significativa fueron las relacionadas con la humedad y temperatura del suelo. La temperatura ambiente, humedad relativa e insolación no mostraron una relación directa con el K en estos análisis. La humedad del suelo favoreció los niveles más altos de este elemento. A mayor velocidad del viento se produjo mayor evaporación y cuando se elevó la temperatura del suelo también lo hizo la evaporación. Cuando se tuvo en cuenta la profundidad del perfil se observó una dependencia inversa entre ésta y los niveles de potasio y directa entre dichos niveles, las precipitaciones y la humedad del suelo. Aunque la literatura reporta pocos resultados de estudios de influencias de variables agrometeorológicas en los contenidos de potasio, se sabe que la humedad del suelo, causada por las precipitaciones o riego, favorece la liberación de potasio desde las reservas y por tanto la elevación de la fracción cambiable (Werner, 1982; Schaff y Skogley, 1985; Rajagopal, 1987). Pero si los niveles de estas precipitaciones son suficientemente altos, el K puede ser arrastrado hacia las profundidades y por tanto el efecto de la humedad ser desfavorable para el incremento de dichos niveles en las capas superiores. La temperatura del suelo tuvo un efecto similar, ya que su dependencia fue inversa de los contenidos de potasio. Esta variable favorece la liberación desde las reservas y elevar el potasio cambiable, pero éste puede moverse hacia la profundidad del perfil.

El resultado final del balance del potasio en el sistema suelo planta ha sido el mantenimiento del tenor de este elemento en el suelo a un nivel alto. La fertilización ha atenuado los descensos del K cambiable y ha contribuido a elevar las reservas de este nutriente (adsorbidas o fijadas), pero no ha satisfecho las necesidades de las rotaciones estudiadas, ya que los aportes han sido inferiores a los gastos. La contribución de los residuos de cosechas dejados en el campo ha jugado un importante rol, devolviéndole al

suelo parte del K extraído y de forma más asequible (en general la planta extrae más de lo que se exporta de ella). El riego no ha sido un factor de contribución potásica ni de cambios apreciables. El ascenso capilar ha repuesto de forma significativa el K lavado, favoreciendo la restitución de este elemento desde las profundidades. El clima ha sido un factor incidente en este proceso sobre todo en la movilidad del potasio en el perfil. Todos estos factores han hecho posible que, aún cuando el balance agrícola haya sido negativo, las plantas no hayan carecido del potasio necesario para su adecuado desarrollo.

4.3 Análisis Económico.

La tabla 42 muestra el resultado del análisis económico realizado para el experimento 4. El costo por peso de producción se elevó con las dosis de fertilizante potásico aplicadas, lo cual hace que sea más recomendable, desde el punto de vista económico, no incurrir en costos para obtener un peso de producción. Además el gasto que genera la compra del fertilizante no es sólo su precio de adquisición, sino que la entidad económica incurre en otros que no son considerados: almacenaje, transportación, etc. Si a todo esto sumamos que en Cuba no hay yacimientos potásicos y se compra con divisas, y que los suelos Ferralíticos rojos dedicados al cultivo de la papa tienen condiciones similares a las estudiadas y tenores altos de K, se hace necesario que la fertilización potásica sea aun más racional. La decisión de fertilizar o no en estos suelos para esta rotación y con cuánto, deberá tener en cuenta la tenencia del fertilizante potásico, el balance económico de su uso, la preservación del suelo, impidiendo el descenso de la fertilidad potásica a un nivel que ponga en peligro su posible recuperación, tiempo que, en estas condiciones sobrepasa los cinco años.

Conclusiones y recomendaciones

1. En un suelo Ferralítico rojo compactado con alto nivel de K cambiable y un tenor de K total igual o superior a 160 cg/kg, se pueden obtener 5 cosechas de papa sin fertilización potásica con rendimientos de alrededor de 20 t/ha con buena calidad, en rotación con maíz con rendimientos de alrededor de 7 t/ha de granos. De acuerdo con esto puede considerarse que en estos suelos no puede lograrse con fertilización potásica, un incremento significativo de la producción de papas ni de su porcentaje de masa seca, debido a que el nivel y asequibilidad de este elemento en el suelo son suficiente para su adecuado desarrollo. Esto indica que las dosis recomendadas por el MINAGRI son excesivas para el K.
2. Se comprobaron las variaciones estacionales en los índices de K cambiable y liberable, lo cual indica que la fracción liberable participa en el equilibrio dinámico de K a corto plazo. Esta fracción no cambiable (pero liberable en HNO_3) se elevó con el empleo de una alta dosis potásica, en una cantidad varias veces la obtenida para el K cambiable, lo que da a esa fracción importancia como reserva potásica a estos suelos. Esta es una de las causas de que, a pesar de que los valores de la relación Q/I para el K son bajas (alrededor de 0,4), en estos suelos se haya manifestado capacidad amortiguadora en relación con los niveles de K cambiable, en lo que influyó también la alta saturación potásica inicial.
3. El empleo de dosis de hasta 420 kg/ha en el campo, elevó el porcentaje de K en el C.A.S. del suelo, desplazando parcialmente otros cationes, pero las relaciones $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{K}$, que resultaron entre 6 y 14, fueron adecuadas para el adecuado desarrollo de los cultivos. De acuerdo con los resultados en el ámbito de laboratorio, con dosis muy altas de fertilizante potásico puede lograrse la sustitución de hasta el 86% del valor T del suelo, lo que afecta los valores adecuados de dichas relaciones. Con el empleo de una concentración catiónica de $(\text{Ca} + \text{Mg})$ por encima de la C.I.C., se eleva el porcentaje de adsorción del K en mayor medida que el del Ca, pudiendo crearse un desequilibrio catiónico nocivo al cultivo.
4. En el ámbito de laboratorio fue comprobada la fijación del potasio, aunque en magnitudes relativamente pequeñas. Para dosis de K_2O de 234 kg/ha pueden fijarse 35 kg de K/ha y puede elevarse con dosis más altas hasta un máximo de 236 kg/ha. Por tanto la fracción de K fijado puede ser una de participantes en el equilibrio dinámico de K e informa de la posible existencia de impurezas de minerales de tres capas en estos suelos.
5. Para estas condiciones y suelo se necesitaron dosis potásicas superiores a 300 kg/ha para obtener para la papa balances agrícolas positivos para un año, los cuales permitieron incrementos de K cambiable, aunque siempre se produjo liberación de las reservas del suelo, detectados porque los niveles de K cambiable fueron superiores a los esperados, de acuerdo con dichos balances. También se manifestó influencia del nivel inicial de K cambiable de tal forma que para mayores valores iniciales, fueron menores los aportes de las reservas.
6. Las variables agrometeorológicas tienen influencia directa o indirecta en los contenidos de K en el suelo, sobre todo la temperatura y la humedad del suelo, las precipitaciones, evaporación y velocidad del viento. La elevación de la temperatura y humedad del suelo

favorecen la liberación del K desde las reservas, y pueden incrementar el K cambiable, si las precipitaciones son inferiores a 60 mm.

7. Con ayuda de experimentos de campo y en columnas pudo estudiarse la influencia de diferentes factores en el balance del potasio en estos suelos. Se demostró que la fertilización elevó el K cambiable y liberable, atenuando los descensos de la reserva del potasio, aunque los niveles de esta fracción fueron altos en el testigo, incluso durante 5 rotaciones de papa maíz. La incorporación de los residuos de cosechas posibilitó la devolución al suelo de K asequible, favoreciendo la residualidad del fertilizante potásico y limitando (al estar absorbido en la planta) las pérdidas por lavado. La norma de riego usada para la papa no causó un lavado apreciable de este elemento en columnas de suelo. No obstante, cantidades de agua que duplican esta norma, provocaron un lavado superior, moviendo K más allá de los 40 cm de la columna; sin embargo los niveles de K cambiable continuaron siendo altos. De forma similar precipitaciones altas (superiores a 60 mm) en el campo fueron seguidas de incrementos de K en las mayores profundidades y decrementos en la superficie. El ascenso capilar ha repuesto de forma significativa el K cambiable, elevando los niveles de K en la superficie del suelo. Tanto en columnas como en el campo, períodos de sequía estuvieron acompañados de elevaciones de esta fracción en las capas superficiales.

Recomendaciones:

1. Ajustar la fórmula completa que se usa para el cultivo de la papa, teniendo en cuenta los altos niveles de potasio en estos suelos de Ciego de Avila y la posibilidad de no fertilizar con este elemento.
2. Cuando se hagan estudios de suelo a partir del potasio cambiable o liberable, tener en cuenta sus variaciones estacionales y dependencia de las variables agrometeorológicas relacionadas con la humedad y temperatura del suelo.

Tablas.

Tabla 1. Propiedades del suelo.

pH (KCl) (Relación 1:2,5)	6.17
P ₂ O ₅	47.13 cg/kg
K	0.79 cmol/kg
Ca	6.17 cmol/kg
Mg	2.92 cmol/kg
Na	0.12 cmol/kg
S	9.88 cmol(+)/kg
T	14.67 cmol/kg
V	67.35 %
Y ₁	2.80 cmol/kg
H _v	2.52%
Ec	290 cm/5h
LSP	51 cm ³
M.O.	2.12%
d _{ap}	1.2 g/cm ³
Capacidad de campo	30.4%
Arcilla	48.82%
Limo	26.19%
Arena	24.99%

Tabla 2. Tratamientos usados en cada uno de los experimentos de campo.

Tabla 2.1 Experimentos 1 y 2 (anuales).

Experimento	Dosis de K ₂ O (kg/ha)			
1) c(K) = 16,5 cg/kg	0	60	120	240
2) c(K) = 20,5 cg/kg	0	75	150	225

Tabla 2.2 Experimento 3 (Fertilización con K y Mg). c(K) = 26,4 cg/kg.

1 ^{er} año, K ₂ O (kg/ha)	2 ^{do} año, Mg (kg/ha)	3 ^{er} año, K ₂ O (kg/ha)
0	0	0 (clave)
	40	
60	0	0 (1)
	40	60 (2)
		0 (3)
120	0	60 (4)
		0 (1)
	40	120 (2)
		0 (3)
180	0	120 (4)
		0 (1)
	40	180 (2)
		0 (3)
300	0	180 (4)
		0 (1)
	40	300 (2)
		0 (3)
40	300 (4)	

420	0	0 (1)
		420 (2)
	40	0 (3)
		420 (4)

Nota: La clave se usará en la discusión de las tablas en los resultados.

Tabla 2.3 Experimento 4. c(K) = 30,6 cg/kg.

1 ^{er} año	2 ^{do} año	3 ^{er} año	4 ^{to} año	5 ^{to} año
0	0	0	0	0 (clave)
80	0	0	0	0 (1) 80 (2)
160	0	0	0	0 (1) 160 (2)
240	0	0	0	0 (1) 240 (2)
320	0	0	0	0 (1) 320 (2)

Tabla 3. Rendimiento (t/ha) en los cuatro experimentos de campo.

Dosis (kg/ha)		Exp.1	Exp.2	Experimento 3			Experimento 4				
		C-1	C-1	C-1	C-2	C-3	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
0		21.3	30.1	20.8	18.3	19.7	21.9 ^{ab}	15.6	19.5 ^c	19.3	13.8
		-	-	-	16.0	22.2	-	-	-	-	-
60	1	20.21	-	19.3	20.9	24.2	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	23.7					
	3				16.6	23.0					
	4					20.0					
75		29.79									
80	1						20.3 ^b	15.6	20.7 ^{bc}	20.5	13.1
	2									13.6	
120	1	20.0		19.0	19.2	22.8					
	2					23.2					
	3				17.3	20.1					
	4					20.7					
150		31.5									
160	1						20.8 ^b	15.4	22.9 ^{ab}	20.5	13.4
	2									15.0	
180	1			20.1	18.5	19.8					
	2					21.2					
	3				16.6	19.7					
	4					19.8					
225		29.7									
240	1	21.8					22.1 ^a	15.4	23.8 ^a	18.2	15.6
	2									19.2	
300	1			19.6	19.0	20.4					
	2					20.6					
	3				17.4	22.4					
	4					20.5					
320	1						20.5 ^b	16.0	22.2 ^{abc}	19.3	15.6
	2									16.5	
420	1			19.4	19.1	21.2					
	2					22.9					
	3				18.1	23.8					
	4					24.9					

<i>Sig</i>	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	NS	NS
<i>CV A</i>	12.0	5.7	12.2	6.2	5.5	5.9	7.3	9.2	8.1	-
<i>AB</i>	-	-	-	19.1	14.2	-	-	-	-	4.3

Tabla 4. Rendimientos (t/ha) obtenidos en experimentos en extensión en condiciones de producción. (K cambiante > 25 cg/kg y P bajo)

Dosis (kg/ha) (Relaciones N:P ₂ O ₅ :K ₂ O)	Rendimiento	Empresa (suelo FRC)	Fecha
250:188:291 (1,3:1:1,5) 100:250:0 (1:2,5:0)	24,9 26,8	Juventud Heroica	1989-1990
175:126:180 (1,4:1:1,4) 100:170:0 (1:1,7:0)	15,73 19,05	La Cuba	1992-1993

Tabla 5. Relaciones (Ca + Mg)/K en el suelo durante el experimento 3.

Momentos de muestreo	Dosis de K ₂ O					
	0	60	120	180	300	420
<i>Inicial</i>	12.30					
<i>C-1 (papa)</i>	8.43	8.55	7.94	7.30	7.65	6.94
<i>C-1 (maíz)</i>	8.73	7.51	8.10	6.70	7.70	6.45
<i>C-2 (p) (1)</i>	9.21	8.79	8.04	8.25	8.86	8.76
<i>C-2 (p) (3)</i>	9.14	8.82	9.22	8.53	8.85	7.95
<i>C-2 (m) (1)</i>	13.78	13.89	10.76	9.88	11.16	11.51
<i>C-2 (m) (3)</i>	16.73	15.01	14.21	10.97	18.09	12.55

Tabla 6. Producción de masa seca (t/ha) a los 60 días.

Dosis (kg/ha)		Exp.1	Exp.2	Exp.3			Exp.4			
		C-1	C-1	C-1	C-2	C-3	C-1	C-2*	C-3	C-5*
0		3.82	5.22 ^b	3.71	4.05	4.38 ^{bc}	4.9	3.79	3.83	3.9
		-	-	-	3.55	5.16 ^a	-	-	-	-
60	1	4.22	-	3.85	3.27	4.12 ^{bc}	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	3.78 ^c	-	-	-	-
	3	-	-	-	3.14	5.37 ^{ab}	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	4.29 ^{bc}	-	-	-	-
75		-	5.35 ^b	-	-	-	-	-	-	-
80	1	-	-	-	-	-	4.91	3.46	5.17	4.34
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	4.43
120	1	4.35	-	3.83	2.91	5.89 ^a	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	5.42 ^{ab}	-	-	-	-
	3	-	-	-	2.69	4.07 ^{bc}	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	4.14 ^{bc}	-	-	-	-
150		-	6.66 ^b	-	-	-	-	-	-	-
160	1	-	-	-	-	-	5.17	3.74	4.54	4.31
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	5.08
180	1	-	-	3.31	3.31	4.78 ^{bc}	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	4.45 ^{bc}	-	-	-	-
	3	-	-	-	2.94	4.77 ^{bc}	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	3.76 ^c	-	-	-	-
225		-	7.20 ^a	-	-	-	-	-	-	-
240	1	4.40	-	-	-	-	5.07	3.70	4.24	4.26
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	4.48
300	1	-	-	3.59	3.07	5.27 ^{ab}	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	5.68 ^a	-	-	-	-

	3	-	-	-	3.62	4.82 ^b	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	5.29 ^{ab}	-	-	-	-
320	1	-	-	-	-	-	4.74	3.71	4.46	4.56
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	4.67
420	1	-	-	3.51	3.25	4.45bc	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	3.98c	-	-	-	-
	3	-	-	-	2.67	4.68bc	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	5.28ab	-	-	-	-
Signif.	N.S.	*	N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	
CV A	14.9	10.0	12.3	11.25	8.45	10.4	9.8	12.5	-	-
AB	-	-	-	15.60	7.10	-	-	-	-	11.76

Tabla 7. Porcentaje de masa seca en los tubérculos cosechados.

Dosis (kg/ha)	Exp.1	Exp.2	Exp.3			Exp.4				
	C-1	C-1	C-1	C-2	C-3	C-1	C-2*	C-3	C-4	C-5*
0	16.8	11.8	17.3	18.7	17.5	18.1	14.3	17.7	15.5	16.3
60	17.5		18.7	17.8	17.5					
75		12.7								
80						16.8	14.3	17.7	14.4	17.8
120	16.1		19.2	19.2	17.5					
150		11.5								
160						17.5	14.6	17.4	14.8	18.7
180			17.8	17.7	17.5					
225		11.6								
240	16.7					18.3	13.3	17.6	16.5	17.8
300			18.2	17.2	17.5					
320						17.4	13.0	17.3	15.1	16.3
420			17.3	17.3	17.5					
Signif.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
CV A	10.2	7.1	9.3	9.7	7.35	8.03	5.7	4.82	3.12	12.1

(*) Cosechados a los 70 días.

Tabla 8. Producción de masas seca (t/ha) en la cosecha.

Dosis (kg/ha)	Exp.1	Exp.2	Exp.3			Exp.4				
	C-1	C-1	C-1	C-2	C-3	C-1	C-2*	C-3	C-4	C-5*
0	3.58	3.55	3.60	3.50	3.41	3.98	2.23	3.45 ^b	2.98	2.26
60	3.53		3.62	2.96	3.55					
75		3.78								
80						3.42	2.23	3.67 ^b	2.95	2.33
120	3.23		3.65	3.69	3.68					
150		3.62								
160						3.64	2.25	3.97 ^{ab}	3.04	2.50
180			3.58	3.27	3.46					
225		3.44								
240	3.69					4.09	2.04	4.20 ^a	3.00	2.78
300			3.56	3.34	3.57					
320						3.46	2.09	3.83 ^b	2.92	2.55
420			3.36	3.31	3.76					
Signif.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.
CV A	14.4	12.2	12.8	13.5	11.7	10.7	6.5	7.94	11.9	13.2

Tabla 9. Porcentaje de K en los tubérculos cosechados.

Dosis (kg/ha)	Exp.1	Exp.2	Exp.3		Exp.4				
	C-1	C-1	C-1	C-2	C-1	C-2*	C-3	C-4	C-5*
0	5.08	3.19 ^c	4.72	4.74	2.69 ^b	2.61	2.29	2.41	2.16 ^c
60	5.31		4.67	5.03					

75		3.35 ^c							
80 (1)					2.82 ^{ab}	2.64	2.25	2.32	2.02 ^c
(2)									2.62 ^a
120	6.32		4.59	5.00					
150		3.66 ^b							
160(1)					2.76 ^{ab}	2.64	2.35	2.61	2.19 ^c
(2)									2.33 ^{bc}
180			4.55	5.01					
225		3.86 ^a							
240(1)	5.78				2.62 ^b	2.27	2.20	2.53	2.43 ^b
(2)									2.50 ^{ab}
300			4.93	4.97					
320(1)					2.92 ^a	2.87	2.32	2.44	2.09 ^c
(2)									2.49 ^{ab}
420			5.02	5.19					
Signif.	N.S.	*	N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.	N.S.	*
CV A	6.4	10.1	8.3	6.49	7.2	8.5	7.35	9.2	
AB									9.56

Tabla 10. Exportación de K en las cosechas.

Dosis (kg/ha)	Exp.1	Exp.2	Exp.3		Exp.4					
	C-1	C-1	C-1	C-2	C-1	C-2*	C-3	C-4	C-5*	
0	181.9	113.2 ^b	169.9	139.8	107.0	58.2	79.6 ^b	71.8	47.23 ^b	47.23 ^b
60	187.4		169.0	145.1						
75		126.6 ^b								
80 (1)					96.4	58.9	82.3 ^b	68.4	46.4	47.8 ^b
(2)								49.3		
120	204.1		167.5	134.7						
150		132.5 ^a								
160(1)					100.5	59.4	93.3 ^{ab}	79.3	52.7	55.7 ^{ab}
(2)								58.7		
180			162.9	137.5						
225		132.8 ^a								
240(1)	213.3				107.0	52.3	93.9 ^{ab}	75.5	58.4	67.1 ^a
(2)								75.9		
300			175.5	139.7						
320(1)					101.0	59.6	94.4 ^{ab}	71.4	59.1	64.6 ^a
(2)								70.1		
420			168.7	140.8						
Signif.	N.S.	*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	*	N.S.	N.S.	N.S.
CV A	11.8	10.51	15.7	16.5	7.0	7.6	9.12	8.32	11.6	
AB										10.4

Tabla 11. Variaciones del K cambiante y liberable en el suelo con la fertilización y una campaña de papa (cg/kg).

Dosis (kg/ha)	Experimento 1						Experimento 2					
	K cambiante			K liberable			K cambiante			K liberable		
	Inicial	Final	Dif.	Inicial	Final	Dif.	Inicial	Final	Dif.	Inicial	Final	Dif.
0	16.5	19.4 ^c	2.9	34.4	38.6 ^b	4.19	20.51	18.76	-1.75	36.3	36.0	-0.3
60		20.8 ^c	1.4		41.0 ^b	2.34						
75								19.11	0.35		42.14	6.14
120		23.6 ^b	4.2		45.4 ^{ab}	6.75						
150								22.87	4.11		44.62	8.62
225								32.63	13.87		55.02	19.02
240		25.9 ^a	6.5		49.4 ^a	10.79						
Sign.	**			*			N.S.			N.S.		
C.V.	6.07			8.16			7.3			7.45		

Tabla 12. Relación entre la extracción de K a los 60 días y la exportación de K en las primeras cosechas (kg/ha).

Dosis (kg/ha)	Experimento 1			Experimento 2		
	Extracción	Exportación	Diferencia	Extracción	Exportación	Diferencia
0	261.2	181.9	79.3	135.3	113.2	22.1
60	271.0	187.4	83.6			
75				140.9	126.6	14.3
120	304.4	204.1	100.3			
150				168.6	132.5	36.1
225				236.3	132.8	103.5
240	276.7	213.3	54.4			

Tabla 13. Balances agrícolas (Fertilización – Exportación) (kg/ha).

Dosis (kg/ha)	Exp.1	Exp.2	Exp.3		Exp.4				
	C-1	C-1	C-1	Total	C-1	C-2	C-3	C-4	Total
0	-181.9	-113.2	-169.9	-289.0	-107.0	-115.4	-195.0	-266.8	-363.8
60	-137.6		-119.2	-286.6					
75		-64.4							
80					-30.0	-88.9	-171.2	-239.6	-286.0
120	-104.6		-67.9	-170.3					
150		-8.0			32.3	-27.1	-120.4	-199.7	-252.4
160									
180			-13.5	-120.0					
225		53.9							
240	14.2				92.2	39.9	-54.1	-129.5	-188.2
300			73.4	-11.6	164.5	104.9	10.5	-60.9	-120.0
320									
420			179.8	135.6					

Tabla 14. Potasio estructural liberable (cg/kg) en cada uno de los experimentos ($K_{\text{liberable}} - K_{\text{cambiable}}$)

Dosis (kg/ha)	Exp. 1	Exp. 2	Experimento 4				
	C-1	C-2	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
0	19.2	17.2	9.6	5.4	20.1	15.2	6.3
60	20.2	-	-	-	-	-	-
75	-	23.0	-	-	-	-	-
80	-	-	9.7	1.1	14.5	15.1	7.7
120	21.8	-	-	-	-	-	-
150	-	21.8	-	-	-	-	-
160	-	-	9.6	6.9	21.3	12.2	6.1
225	-	22.4	-	-	-	-	-
240	23.5	-	6.5	9.9	24.7	17.6	7.9
320	-	-	16.8	4.6	19.4	21.5	

Tabla 15. Contenidos de K cambiable (cg/kg) en la profundidad del perfil del experimento 4 en tres momentos de muestreos y para tres tratamientos.

Tratamientos	Inicial	Testigo		160 kg/ha		320 kg/ha	
Momentos de muestreos		C-1	C-5	C-1	C-5	C-1	C-5
Prof. (cm)							
10	27,7 _a	23,3 _a	23,8 _a	26,3 _a	23,2 _a	37,6 _a	27,4 _a
20	26,0 _a	20,0 _a	-	25,3 _a	-	35,3 _a	-

30	21,4 ^a	19,6 ^a	17,4 ^a	21,4 ^a	16,8 ^a	34,4 ^a	20,5 ^a
40	12,6 ^{me}	15,9 ^a	-	17,7 ^a	-	25,1 ^a	-
50	10,2 ^{mo}	-	11,5 ^{me}	-	13,3 ^{me}	-	17,6 ^a
60	12,6 ^{me}	-	10,5 ^{mo}	-	7,8 ^{mo}	-	10,3 ^{mo}
70	10,9 ^{mo}	-	-	-	-	-	-
80	10,7 ^{mo}	-	5,5 ^b	-	-	-	8,2 ^a
90	14,0 ^{me}	-	4,4 ^b	-	-	-	7,7
100	8,8 ^{mo}	-	-	-	-	-	-

Fechas de los muestreos: Inicial: Noviembre de 1985 (muestreo 1), C-1: Abril de 1987 (muestreo 2), C-5: Noviembre de 1991 (muestreo 11). Las letras son los índices de interpretación según Fundora (1981): **alto** (>14), **medio** (11-14), **moderado** (7-11) y **bajo** (<7).

Tabla 16. Contenidos de K liberable (cg/kg) en la profundidad del perfil del experimento 4 en tres momentos de muestreos y para tres tratamientos.

Momentos de muestreos	Inicial	Testigo		160 kg/ha		320 kg/ha	
		C-1	C-5	C-1	C-5	C-1	C-5
Prof. (cm)							
10	38,0b	34,5b	41,1b	38,3b	43,9m	60,3m	47,5m
20	37,4b	31,8b		40,3b		49,0b	
30	22,6b	25,7b	30,2b	35,3b	23,3b	48,0b	32,3b
40	19,1b	24,5b		32,3b		37,8b	
50	18,6b		22,4b		23,7b		25,3b
60	23,4b		17,9b		36,1b		19,8b
70	20,8b						
80	20,9b		12,1b				21,9b
90	26,0b		10,6b				22,4b
100	16,3b						

Fechas de los muestreos: Inicial: Noviembre de 1985 (muestreo 1), C-1: Abril de 1987 (muestreo 2), C-5: Noviembre de 1991 (muestreo 11). Las letras son los índices de interpretación según Págel (1972): **alto** (>40), **medio** (20-40) y **bajo** (<20).

Tabla 17. Influencia de la dosis de K en el contenido de K cambiable en columnas de suelo $c(K)_i = 0,79$ cmol/kg [A]

Dosis de K_2O		c(K) (cmol/kg) en la profundidad de la columna (cm)				
k / ha	cmol/kg	0 - 20	20 - 40	promedio	D	E
	B			C	C-A	D-B
160	0.09	1.13	1.15	1.14	0.36	0.27
320	0.18	1.33	1.23	1.28	0.49	0.31
960	0.54	1.86	1.26	1.66	0.87	0.33
3 200	1.80	3.31	2.27	2.96	2.17	0.37

Tabla 18. Influencia de la dosis de K en el contenido de K cambiable del experimento 4. $c(K) = 0,79$ cmol/kg [A]

Dosis		c(K) cmol/kg		
K_2O	K	Prom. 30 cm	D	E
kg/ha	cmol/kg (B)	C	C - A	D - B
160	0.09	0.68	- 0.10	0
320	0.18	0.93	0.15	0

Tabla 19. Influencia del intervalo de riego (IR) y la norma de riego parcial (NR) en los contenidos de K cambiable en columnas de suelo para dosis de 320 kg/ha.

I.R. (días)	NR total		c(K) cg/kg en la profundidad (cm)					
	m ³ /ha.	mL/col	0 - 20	20 - 40	prom.	C - A	D - B	Percol.
1	9890	2610	0.87	0.97	0.91	0.13	0	0.11

5	9890	2610	0.88	1.00	0.92	0.14	0	0.10
5	4340	1104	1.33	1.23	1.28	0.50	0.32	0.03

Tabla 20. Variaciones del porcentaje de K con la fertilización inicial y los cultivos del experimento 3

Dosis kg/ha	Relaciones (%)	Momentos de muestreo del suelo			
		C-1 (2)	C-1 (3)	C-2 (4)	C-2 (5)
0	c(K)/S	10.6	10.3	9.8	6.8
	c(K)/T	5.4	5.0	4.9	4.0
60	c(K)/S	10.4	11.7	10.2	6.7
	c(K)/T	5.4	5.3	5.2	4.2
120	c(K)/S	11.1	11.0	11.1	8.5
	c(K)/T	5.9	5.4	5.4	4.6
180	c(K)/S	12.0	13.0	10.8	9.2
	c(K)/T	6.5	6.0	5.4	5.0
300	c(K)/S	11.6	11.5	10.1	7.9
	c(K)/T	6.1	5.7	5.3	4.8
420	c(K)/S	12.6	13.4	10.2	8.0
	c(K)/T	6.8	6.1	5.4	4.7

Tabla 21. Cantidad de cationes desplazados con NH₄Ac (1 mol/L y pH = 7)

Muestreo	n(K/1)	n(Ca/2)	n(Mg/2)	Total n(X/z*)	[n(X/z*)]/T (%)
1	0.032	0.169	0.166	0.368	2.5
2	0.047	0.83	0.267	1.44	7.8
3	0.116	2.09	1.204	3.410	23.2
4	0.430	0.963	0.514	1.908	13.0
5	0.151	0.381	0.094	0.626	4.13
6	0.069	0.243	0.048	0.360	2.4
7	0.018	0.196	0.033	0.247	1.7
8	0.005	0.116	0.016	0.138	0.9
9	0.001	0.116	0.081	0.199	1.3
Totales	0.87	5.10	2.42	8.39	
n(X/z*)/T (%)	5.90	34.70	16.50	57.10	

Tabla 22. Cantidad de cationes desplazados con NH₄Ac y residuales en las columnas.

	n(K/1)	n(Ca/2)	n(Mg/2)	n(totales/z*)
Desplazados (d)	0.870	5.10	2.42	8.39
Residuales (r)	0.013	1.87	0.89	2.77
Totales (t)	0.883	6.97	3.31	11.16
d/t (%)	98.5	73.2	73.1	75.2
t/T (%)	-	-	-	76.1

Tabla 23. Fraccionamiento del potasio (cmol/kg) en la columna tratada con NH₄Ac.

Fracción	Momento del muestreo		K lixiviado (K _{lix})	K _{desp} /K _{in} (%)
	Inicial	Final		
Cambiable (c)	0.58	0.013	0.567	97.7
Liberable (l)	1.02	0.430	0.590	57.8
(l - c)	0.44	0.417	0.023	5.2
Total (t)	2.32	1.600	0.720	31.0
(t - l)	1.30	1.170	0.130	10.0

Tabla 24. Cantidad de cationes desplazados con c(KCl) = 0,1 mol/L

Muestreo	n(Ca/2)	n(Mg/2)	n(Na/1)	Total n(X/z*)	n(X/z*)/T (%)
1	1.214	0.624	0.055	1.893	12.88
2	0.933	0.374	0.034	1.341	9.12

3	1.025	0.467	0.014	1.506	10.24
4	0.881	0.519	0.008	1.408	9.58
5	0.981	0.544	0.007	1.532	10.42
6	0.252	0.102	0.007	0.361	2.46
7	0.624	0.265	0.003	0.892	6.07
8	0.316	0.158	0.005	0.479	3.26
9	0.233	0.109	0.003	0.345	2.35
<i>totales</i>	6.460	3.162	0.136	9.757	-
<i>n(X/z*)/T (%)</i>	44.00	21.30	0.92	66.37	-

Tabla 25. Cantidad de cationes desplazados con KCl y residuales en las columnas.

	n(Ca/2)	n(Mg/2)	n(Na/1)	n(totales/z*)
<i>Desplazados (d)</i>	6.46	3.16	0.360	9.98
<i>Residuales (r)</i>	1.26	1.24	0.160	2.66
<i>Totales (t)</i>	7.72	4.40	0.296	12.64
<i>d/t (%)</i>	83.70	71.90	69.23	21.00
<i>t/T</i>	-	-	-	86.0

Tabla 26. Fraccionamiento del K (cmol/kg) en las columnas tratadas con KCl.

<i>Fracción</i>	Momento del muestreo		Final – Inicial
	Inicial	Final	
<i>Cambiable (c)</i>	0.58	1.61	1.03
<i>Liberable (l)</i>	1.02	11.07	10.05
<i>(l – c)</i>	0.44	9.46	9.02

Tabla 27. Relaciones entre cationes residuales en las columnas.

Relaciones	Momento del muestreo	
	Inicial	Final
Ca / K	8.62	0.78
Mg / K	5.34	0.77
(Ca + Mg) / K	13.96	1.55

Tabla 28. Adsorción de iones K⁺ y Ca²⁺ de 15 cmol/kg.

K_{agregado}	K_{adsorbido}	% K_{adsorbido}	Ca_{agregado}	Ca_{adsorbido}	% Ca_{adsorbido}
			9.0	0.47	5.2
			10.5	1.57	15.0
12.0	0.26	2.2	12.0	2.67	22.2
13.5	0.75	5.5			

Tabla 29. Adsorción de iones K⁺ y Ca²⁺ de 30 cmol/kg.

K_{agregado}	K_{adsorbido}	% K_{adsorbido}	Ca_{agregado}	Ca_{adsorbido}	% Ca_{adsorbido}
6	3.17	53			
9	2.38	26			
12	0.83	7			
15	2.32	15	15	0.1	0.6
18	3.42	19	18	0.7	3.9
21	4.91	23	21	0.3	1.4
24	5.75	24	24	1.2	5.0
27	6.74	25			

Tabla 30. Adsorción de iones K⁺ y Ca²⁺ de 100 cmol/kg.

K_{agregado}	K_{adsorbido}	% K_{adsorbido}	Ca_{agregado}	Ca_{adsorbido}	% Ca_{adsorbido}
20	4.94	25.0			
40	3.89	9.7			
50	0.73	1.5	50	5.3	10.6
60	4.15	7.0	60	3.4	5.720

70	0.99	1.4	70	2.0	2.8
80	3.10	3.9	80	5.4	6.7
90	8.50	0.1			

Tabla 31. Influencia del contenido de K y Ca (cmol/kg) de la solución extractiva en la adsorción de K por el suelo.

$c(K)_i$	$c(Ca)_i$	$c(K)_f$	K	% ads.	$c(Ca)_i$	$c(K)_i$	K	% ads.
0		0.22	-0.22	-		0.38	-0.38	-
0.13		0.29	-0.16	-		0.46	-0.33	-
0.26		0.34	-0.08	-		0.62	-0.36	-
0.51		0.40	0.11	21.6		0.81	-0.30	-
0.77	0	0.50	0.27	35.0	50	1.02	-0.25	-
1.02		0.62	0.40	39.0		1.16	-0.14	-
1.28		0.80	0.48	37.5		1.36	-0.08	-
1.54		0.79	0.75	48.7		1.48	0.06	3.9
1.80		0.97	0.83	48.1		1.49	0.31	17.2

Tabla 32. Porcentaje de cada fracción con respecto al K total en muestreos de suelo del experimento 4.

Dosis de K_2O (kg/ha)	Fracción de K	Número de los muestreos realizados				
		Inicial (1)	(5)	(6)	(9)	(11)
0	Cambiable	19.6	18.6	16.4	9.2	19.0
	Liberable	8.3	10.3	14.3	12.7	14.7
	Reserva	72.1	71.4	69.3	78.1	66.3
80	Cambiable		13.9	18.5	11.7	20.4
	Liberable		12.2	12.2	10.4	13.1
	Reserva		87.8	69.3	77.9	66.5
160	Cambiable		16.7	17.4	13.4	17.1
	Liberable		4.8	8.0	9.4	16.6
	Reserva		78.5	74.6	77.2	66.3
240	Cambiable		14.7	16.4	13.2	18.3
	Liberable		9.1	16.5	9.2	12.0
	Reserva		76.2	67.1	77.6	69.7
320	Cambiable		14.3	17.4	15.9	18.4
	Liberable		7.4	14.0	11.6	13.8
	Reserva		78.3	68.6	72.5	67.8

Tabla 33. Contenidos de K (cg/kg) liberados con mufla.

Número de muestra	$K_{\text{cambiable}}$	Después del 1 ^{er} calcinado.	Después del 2 ^{do} calcinado.
1	17.46	4.5	-
2	18.43	5.24	-
3	16.88	4.66	-
4	20.0	4.50	5.5
5	19.5	5.00	5.5

Tabla 34. Parámetros calculados para las isotermas de sorción de K en tres muestreos del experimento 4.

Muestreo (número)	Dosis (kg/ha)	$c(K)_O$ (cg/kg)	K_0	Q/I	Máxima K	$c(K)_{\text{cambiable}}$ (cg/kg)	$c(K)_{\text{liberable}}$ (cg/kg)
C-1 (2)	0	42.6	16.2	0.38	1.74	23.6	33.2
C-2 (4)		41.4	9.1	0.22	2.20	29.1	34.5
C-4 (8)		52.1	24.5	0.47	11.90	17.2	32.4
C-1 (2)	80	40.8	16.3	0.40	2.37	25.1	34.8
C-2 (4)		44.7	14.3	0.32	2.16	29.0	30.1
C-4 (8)		76.0	26.6	0.35	4.45	15.6	30.7
C-1 (2)	160	47.0	24.9	0.53	0.44	26.7	36.3
C-2 (4)		31.8	9.6	0.30	2.05	31.4	38.0
C-4 (8)		57.7	24.8	0.43	6.80	15.6	27.8
C-1 (2)	240	53.1	27.6	0.52	0.00	30.5	37.0

C-2 (4)		39.6	10.6	0.27	1.90	32.8	42.7
C-4 (8)		70.5	28.2	0.40	4.00	15.7	35.2
C-1 (2)		69.3	36.0	0.52	0.00	36.4	53.2
C-2 (4)	320	54.1	11.9	0.22	0.31	33.0	37.5
C-4 (8)		65.3	23.5	0.36	0.70	21.3	42.8

Tabla 35. Niveles de K obtenido (cg/kg) por fertilización (320 kg/ha) en columnas de suelo de diferentes tenores iniciales de potasio. (10 y 30 cg/kg)

Número del tratamiento	C(K) _{inicial} en cada mitad de la columna	C(K) _{final} en diferentes profundidades (cm)					Incrementos 20 cm / 40 cm
		0-10	10-20	0-20	20-40	media	
4.1	30	58.6	45.6	52.1	43.1	49.1	22 / 13
4.5	30 / 30	42.6	53.7	48.1	42.0	46.1	18 / 12
4.4	10 / 30	21.3	57.2	39.2	54.5	44.3	29 / 24
4.3	30 / 10	37.7	48.0	40.8	40.8	40.8	12 / 31
4.6	10 / 10	18.2	25.2	21.8	44.7	29.4	12 / 35
4.2	10	23.5	23.3	23.4	24.9	23.9	13 / 15

Tabla 36. Balance de potasio (cg/kg) para el experimento 1 con una c(K)_{inicial} de 16,5 cg/kg (A).

Dosis K ₂ O	(kg/ha)	C(K) _{fertilizante}	(A+B)	Export.	(B-D)	C(K) _{final}	(C-D)	(F-G)
	K	B	C	D	E	G	F	I
0		0	16.5	5.05	-5.05	19.4	11.45	-7.95
60	49.79	1.38	17.88	5.20	-3.82	20.8	12.68	-8.12
120	99.57	2.77	19.27	5.67	-2.9	23.6	13.60	-10.00
240	199.15	0.53	22.03	5.92	-0.39	25.9	16.11	-9.79

Tabla 37. Balance de potasio (cg/kg) para el experimento 3 con una c(K)_{inicial} de 26.4 cg/kg (A)

Dosis K ₂ O	Año	C(K) _{fertilizante}	(A+B)	Export.	(B-D)	C(K) _{final}	(C-D)	(F-G)
		B	C	D	E	G	F	I
0	1	0	26.4	4.71	-4.71	24.0	21.69	-2.31
	1+2	-	-	8.59	-8.59	23.2	17.81	-5.39
60	1	1.38	27.78	4.69	-3.31	24.7	23.09	-1.61
	1+2	-	-	8.72	-7.34	24.2	19.06	-5.14
120	1	2.77	29.17	4.65	-1.88	31.4	24.52	-6.88
	1+2	-	-	8.39	-5.62	26.7	20.78	-5.92
180	1	4.15	30.55	4.52	-0.37	33.1	26.03	-7.07
	1+2	-	-	8.34	-4.19	26.9	22.21	-4.69
300	1	6.92	33.32	4.87	2.05	34.6	28.45	-6.15
	1+2	-	-	8.75	-1.83	28.4	24.57	-3.83
420	1	9.68	36.08	4.69	4.99	39.2	31.39	-7.81
	1+2	-	-	8.60	1.08	28.7	27.48	-1.22

Tabla 38. Balance de potasio (cg/kg) para el experimento 4 con una c(K)_{inicial} de 30,6 cg/kg (A)

Dosis K ₂ O	Año	C(K) _{fertilizante}	(A+B)	Export.	(B-D)	C(K) _{final}	(C-D)	(F-G)
		B	C	D	E	G	F	I
0	1	0	30.6	3.76	-3.76	23.58	26.84	3.26
	1-5			14.05	-14.05	22.1	20.55	-1.55
80	1	1.84	32.44	3.50	-1.66	25.06	28.94	3.88
	1-5			13.89	-12.05	24.1	18.55	-5.55
160	1	3.69	34.3	3.55	0.14	26.74	30.75	4.01
	1-5			14.49	-10.80	25.8	19.01	-6.79
240	1	5.53	36.13	3.67	1.86	30.52	32.46	1.94
	1-5			14.25	-8.72	26.3	21.88	-4.48
320	1	7.38	38.0	3.51	3.87	36.41	34.49	1.92
	1-5			14.24	-6.86	32.1	23.76	-8.34

Tabla 39. Incrementos de cationes cambiables y percolados (cmol/kg) con respecto a los testigos en la profundidad de las columnas.

Profundidad (cm)	Cationes cambiables			
	K		Ca + Mg + Na	
	1	3	1	3
0-10	0.65	0.16	1.8	2.68
10-20	0.48	0.19	1.29	4.93
20-30	0.28	0.04	2.51	6.89
30-40	0.35	0.11	4.29	4.17
media	0.44	0.13	2.48	4.66
Percolados	0.03	0.20	0.13	0.00

Tabla 40. Variables estandarizadas en los análisis de componentes principales.

Variables	Coefficientes
Prof.	-0.4857
T.S.	-0.2431
H.S.	0.3314
PP	0.5592
c(K)	0.5090

Tabla 41. Rangos de variables en análisis factorial de correspondencias múltiples.

c(K)	b(1-10)	m(11-14)	a(15-60)
Profundidad	> 60	30	15
T.S.	37-48	37-48	32-37
H.S.	< 25	< 25	> 25
P.P.	> 60	> 60	< 60

Tabla 42. Análisis económico para el experimento 4.

Dosis (kg/ha)	Papa t/ha/año	Valor prod.	Maíz t/ha/año	Valor prod.	Costo del KCl	(V ₁ +V ₂)	Costo / peso
0	18.02	3972.5	7.1	888.3	0	4860.80	0
80	18.04	3977.1	7.2	900.8	19.02	4877.90	0.0039
160	18.60	4100.5	8.1	1013.4	38.04	5113.40	0.0074
240	19.02	4193.1	7.3	913.3	57.06	5106.40	0.0110
320	18.64	4109.2	8.0	1000.9	76.08	5110.10	0.0150