



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**“DINÁMICA NUTRIMENTAL DEL POTASIO EN ESPECIES
VEGETALES CON DIFERENTE DENSIDAD RADICAL”**

TESIS PROFESIONAL

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

Orientación en: Uso Integral del Agua

**PRESENTA:
LEÓN LÓPEZ JUAN CARLOS**

Chapingo, México, Enero de 2011



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES





DINÁMICA NUTRIMENTAL DEL POTASIO EN ESPECIES VEGETALES CON DIFERENTE DENSIDAD RADICAL

Tesis realizada por **Juan Carlos León López** bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA
ORIENTACION: USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR


DRA. TERESA M. HERNÁNDEZ MENDOZA

ASESOR


DR. ARTURO GALVIS SPÍNOLA

ASESOR


M.C. RENÉ MARTÍNEZ ELIZONDO



AGRADECIMIENTOS

A **DIOS**, ante todo, por regalarme el soplo de vida que me permitiera llegar a cumplir uno de los caprichos más grandes de mi formación profesional; por poner en mi camino a todas aquellas personas que con sus palabras y acciones me guiaran por el sendero idóneo, siempre motivándome a ser un mejor estudiante, un mejor amigo, una mejor persona.

A la **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**, la magnífica institución que me abrió las puertas a un mundo basto de conocimiento, que me acogiera en su seno y cuidara de mí en toda la extensión de la palabra; además de darme la oportunidad de aumentar en una escala mayor la forma en la que percibo el mundo.

A **POSGRADO** (Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua), gracias a él, estoy llegando a un momento cumbre como profesionista, momento que perseguí desde el instante en que me permitió formar parte de un grupo tan selecto de investigadores.

A **CONACYT**, porque sin su apoyo económico me hubiese sido imposible ver realizada esta que considero una meta de vida.

A la **Dra. Teresa Hernández Mendoza**, por su incansable labor, que más que mi tutora se convirtió en un mentor que me ha ayudado a lo largo de este proyecto, tanto en el aspecto académico como personal, brindándome siempre su amistad, confianza y comprensión.

Al **Dr. Arturo Galvis Spínola**, y al **M.C. René Martínez Elizondo** por que el que compartieran su conocimiento conmigo fue una pieza clave para los estudios que he realizado.

A **mis amigos del posgrado en IAUIA**, que siempre estuvieron ahí, con una sonrisa motivacional disponible para su servidor (Osias, Estela, Carlos, Daniel, Cuauhtémoc, José Manuel, Evaristo, Juan de Dios, Yam, Mario y al resto del posgrado).

A **mis amigos de CHAPINGO** por tener una frase alentadora, un saludo, un abrazo que significaran en su momento un gran empuje a seguir adelante y en especial a Manuel Nulutagua "Nulu", Octavio Luna "woody" Ramiro "cucho" y a Iram "Chivo" por sus incontables desveladas apoyándome con esta investigación.

Y a todas las personas que de una u otra manera formaron parte de mí crecer académico muchas gracias por estar siempre conmigo.



DEDICATORIA

A mis padres:

Abel León Santis

y

María del Socorro López Hernández

A mis hermanos:

Marco Antonio

Fredy

Nayeli

y

Leonardo Daniel

A mi abuela

Esther Santis López (QEPD)

Y a toda la familia León López

Con admiración, cariño y amor siempre las llevo en mi corazón.



DATOS BIOGRAFICOS

Nacido en una pequeña ciudad del Estado de Chiapas, el día 11 de diciembre de 1984, recibido en el ceno de una familia humilde que para ese entonces acogía a su tercer hijo varón. Curso los estudios primarios en la escuela del barrio, muy próxima a su casa, desde este momento los catedráticos que le impartían clases se percataron del entusiasmo e interés que el pequeño prestaba a cada una de sus materias; con especial y mayor empeño cuando era momento de resolver problemas de matemáticas. De tal suerte que culmino de manera satisfactoria la educación primaria.

Fue la escuela Secundaria Técnica Numero 29, la que le brindaría la oportunidad de prepararse, tanto social como académicamente, aquel gusto nacido poco tiempo atrás había de brindar frutos pues fue a mediados de esta etapa que se vio motivado por el Prof. Casto Antonio Alvarado (QEPD) a explotar el potencial que indirectamente el joven había demostrado, permitiéndole de esta manera formar parte de un grupo selecto de estudiantes dedicados a estudiar y poner en práctica sus conocimientos en el terreno de las ciencias exactas; las matemáticas se convirtieron en una herramienta más que en una materia que le estaba dando la oportunidad de realzar el nombre de la Institución que lo amparaba, viéndose envuelto en un mundo de competencias y exámenes en donde consiguió como mas alto triunfo el Segundo lugar Estatal en Matemáticas para nivel secundaria.

Pasada la euforia semi-infantil se vio cursando ahora el nivel preparatorio en su ciudad natal, siendo entonces la Preparatoria Lázaro Cárdenas del Rio quien le abriera las puertas a un estudio que teñido de un tinte mas adulto, no lo ínsito como tal a continuar con el mismo empeño, por lo que esta etapa la culminaría de una forma más ligera y guiado por ese instinto transitorio entre el adolescente y el adulto en que se estaba transformando.

A la edad de 18 años enfrentándose a la decisión más grande, aquella que decidiría el rumbo al que guiaría su vida, en plena confusión, decidió escuchar las palabras de aliento y orientación de su hermano mayor Marco Antonio le recomendaba



plenamente ingresar a la Universidad Autónoma Chapingo, puesto que para ese momento él se encontraba dentro de esta distinguida institución, por lo tanto era consciente de todos los beneficios que podría obtener si conseguía ingresar a ella; fue entonces como resuelto a formar parte de esta universidad presento el examen de selección, el cual. Para su sorpresa poco tiempo después diera por hecho que había cumplido con su cometido. Entonces emprendió un nuevo camino de aprendizaje, decidiendo como la rama que definiría su vida profesional la de Ingeniería en Irrigación, tras cuatro años de estudio dio por terminada satisfactoriamente esta etapa.

Sin embargo no fue suficiente, puesto que poco tiempo después de haber concluido la ingeniería, para ser un poco más exactos a mediados del mes de julio del año 2008, decidió unirse a los estudios de maestría en el Programa de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua enfocándose guiado por la incitación personal, al estudio de relaciones entre agua, suelo, planta y atmosfera.



ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
INDICE GENERAL	vii
INDICE DE CUADROS	ix
INDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
SUMMARY	xiii
I.- INTRODUCCION	1
II.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
III.- REVISION DE LITERATURA.....	4
3.1 Antecedentes	4
3.2 Generalidades de los Sustratos con fines agrícolas	9
3.2.1 Propiedades físicas de los sustratos.....	12
• Densidad aparente	12
• Porosidad	13
• Aireación.....	13
• Capacidad de adsorción de agua.....	14
3.2.2 Propiedades químicas de los sustratos	15
• pH	16
• Conductividad eléctrica.....	19
• Intercambio catiónico	20
• Intercambio aniónico	25
3.3 Dinámica del Potasio en suelos y sustratos	27



3.3.1 Formas y capacidad amortiguadora del Potasio	29
3.3.2 Potasio en la solución del suelo (Ks)	31
3.3.3 Potasio intercambiable (Ki)	33
3.3.4 Potasio no intercambiable (Kni)	37
3.3.5 Capacidad amortiguadora de potasio (cK).....	42
3.3.6 Importancia de las Raíces en el proceso de absorción de Potasio...	48
• Resistencia mecánica del suelo al desarrollo radicular	56
• El sistema radicular como integrador de las relaciones suelo-planta	58
3.4 Resumen de la Revisión de Literatura	61
IV.- MATERIALES Y METODOS.....	63
Siembra de los cultivos	63
Trasplante y Fertilización de los cultivos.....	64
Muestreo y colecta de datos del experimento en Peso Fresco	66
Colecta de datos en peso seco y molienda de las muestras	66
Análisis estadístico de la información	67
V.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
5.1 Peso fresco (parte aérea)	68
5.2 Volumen en fresco de la raíz.	70
5.3 Peso Seco (Parte aérea).....	73
5.4 Densidad Radical con respecto a los sustratos.....	76
VI. – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
VII. - REVISION DE LITERATURA	81



INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de los sustratos de uso agrícola	9
Cuadro 2. Proceso y factores involucrados en el movimiento de los nutrientes del suelo a la planta (Junk, 1991).	50
Cuadro 3. Dosis para cada tipo de Sustrato en el cultivo de la Avena.....	64
Cuadro 4. Dosis para cada tipo de Sustrato en el cultivo del Frijol	64
Cuadro 5. Dosis para cada tipo de Sustrato en el cultivo de la Cebolla.....	65



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre pH del suelo y la disponibilidad de nutrimentos	17
Figura 2. Representación de la arcilla y los iones presentes tanto absorbidos en la arcilla como en la solución del suelo.	22
Figura 3. Influencia del tipo de arcilla en la capacidad de intercambio catiónico...	24
Figura 4. Esquema simplificado de la dinámica del K en el suelo en un sistema de producción agrícola.	30
Figura 5. Peso fresco del cultivo de cebolla en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.....	68
Figura 6. Peso fresco del cultivo de avena en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.	69
Figura 7. Peso fresco del cultivo de frijol en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.....	69
Figura 8. Peso fresco de la raíz del cultivo de avena en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.....	71
Figura 9. Peso fresco de la raíz del cultivo de cebolla en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.	72
Figura 10. Peso fresco de la raíz del cultivo de frijol en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.....	72
Figura 11. Peso seco de la parte aérea del cultivo de Cebolla en cuatro sustratos bajo diferentes niveles de K.	74



Figura 12. Peso seco de la parte aérea del cultivo de Frijol en cuatro sustratos bajo diferentes niveles de K.	74
Figura 13. Peso seco de la parte aérea del cultivo de Avena en cuatro sustratos bajo diferentes niveles de K.	75
Figura 14. Respuesta del Fertilizante Potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Agrolita.....	77
Figura 15. Respuesta del Fertilizante Potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Tezontle	77
Figura 16. Respuesta del Fertilizante Potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Peat-Moss.....	78
Figura 17. Respuesta del Fertilizante Potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Mezcla.....	78



DINAMICA NUTRIMENTAL DEL POTASIO EN ESPECIES VEGETALES CON DIFERENTE DENSIDAD RADICAL

León López J. C.¹, Hernández Mendoza T M.², Galvis Spinola A.³ y Martínez Elizondo R.²

RESUMEN

El trabajo consistió en la generación de las curvas de acumulación de materia seca y absorción de potasio en tres especies con diferente densidad radical (frijol, maíz y avena), para evaluar uno de los aspectos que involucra la dinámica nutrimental del potasio en la planta y en el suelo o sustrato. Se establecieron los cultivos en bolsas de polietileno de 40 x 40 y utilizando 4 tipos de sustratos (agrolita, tezontle, peat-moos y mezcla) con diferente grado de reactividad. Se hizo una fertilización de fondo, manual, utilizando nitrato de potasio, y mediante el sistema de riego por goteo se implementaron los demás nutrientes. Se colectaron muestras vegetales y de sustrato en cuatro etapas fenológicas durante el ciclo de los cultivos; determinando longitud, peso fresco, peso seco de parte aérea, y en raíz peso fresco, peso seco y volumen. Se concluye que la absorción del fertilizante potásico es función de la densidad radical que presenta cada especie.

Palabras clave: acumulación de materia seca, absorción de fertilizante potásico.

¹Pasante de la maestría en IAUIA

²Profesor investigador del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo.

³Profesor investigador de Colegio de Posgraduados



NUTRIENT DYNAMICS OF POTASSIUM IN PLANT SPECIES WITH DIFFERENT RADICAL DENSITY

León López J. C.¹, Hernández Mendoza T M.², Galvis Spinola A.³ y Martínez Elizondo R.²

SUMMARY

This study generated dry matter accumulation and potassium absorption curves for three species with different root density (beans, corn and oats) to evaluate one of the aspects that involve the nutrient dynamics of potassium in the plant and in the soil or substrate. Crops were established in 40 x 40 polythene bags and 4 different substrates (perlite, volcanic rock, peat-moss and a mix) with different degrees of reactivity were used. Deep root fertilization was added manually, using potassium nitrate, and the other nutrients were applied by drip irrigation. Plant and substrate samples were collected in four phenological stages during the crop cycle, determining the length, fresh weight, and dry weight of the shoot, and root fresh weight, dry weight and volume. It is concluded that the absorption of potassium fertilizer is a function of the root density presented by each species.

Key words: dry matter accumulation, absorption of potassium fertilizer.

¹Intern expertise in IAUIA

²Research Professor of the Department of Irrigation of the Universidad Autónoma Chapingo.

³ Research professor of Colegio de Posgraduados



I.- INTRODUCCION

La fertilización es una de las técnicas que más ha progresado en las últimas décadas, constituye uno de los pilares fundamentales de la producción agrícola. Hoy en día no se concibe la explotación agrícola sin una adecuada fertilización que permita obtener del suelo o sustrato toda su capacidad productiva, cuando estos no son capaces de suministrarlos en cantidad y tiempo apropiados durante su ciclo de crecimiento y desarrollo. La eficiencia de uso de fertilizantes en un sistema de producción puede definirse como la relación que guarda entre salidas con respecto a las entradas de un sistema y mediante esta cuantificación es posible hacer un manejo agronómico apropiado de estos para lograr de manera eficiente el máximo rendimiento con respecto al tiempo, manteniendo o mejorando la rentabilidad del sistema y evitando contaminación por exceso de fertilizantes.

Se define como elementos nutritivos a los elementos químicos que son absolutamente imprescindibles o esenciales para el desarrollo completo del ciclo vegetativo de la planta. Después del Nitrógeno (N), el Potasio (K) es uno de los nutrientes que las plantas consumen en mayores cantidades que cualquier otro, pero en muchos cultivos hortícolas es extraído en cantidades superiores al Nitrógeno (Le Bot *et al.*, 1998). Sin embargo, debido a la mineralogía de los suelos, la cantidad de potasio disponible casi siempre supera la demanda de los cultivos, lo que lo hace menos deficitario que el N y P. Sin embargo en muchos ambientes agrícolas existen deficiencias de este



elemento ya sea por la génesis del suelo o porque han estado sometidos a una intensa producción agrícola sin la adición de fertilizantes potásicos a tal grado que la disminución de las reservas edáficas de potasio limitan su rendimiento.

El hecho de que la parte de la planta que normalmente se halla en contacto con el suelo sea el sistema radicular, se supone, lógicamente, que la mayor parte de las interacciones entre el suelo y la planta se desarrollen en este sistema suelo-raíz (Domínguez, 1997). Para ello, se hace necesario conocer, aunque sea sucintamente, los principios por los que se rige el desarrollo radicular, así como tener una idea de conjunto de la magnitud del mismo. Por medio de este sistema, la planta se adapta al suelo y es capaz, dentro de ciertos límites, de superar muchas condiciones adversas. El entendimiento de la dinámica del K en el suelo permite, desde el punto de vista de la nutrición de cultivos, establecer una relación cuantificada entre los diferentes reservorios de K y la asociación de estos en la absorción de K por los cultivos. En función de la comprensión que tengamos del sistema suelo-planta relacionado con el K, podremos intervenir adecuadamente en el sistema de producción, sincronizando la demanda y el suministro de este nutrimento con el propósito de obtener altas producciones con calidad superior.

Es por esto que, el propósito de este trabajo consistió en la generación de las curvas de acumulación de materia seca y absorción de potasio en tres especies con diferente densidad radical (frijol, maíz y avena), para evaluar uno de los aspectos que involucra la dinámica nutrimental del potasio en la planta y en el suelo o sustrato



II.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo:

Generar las curvas de acumulación de materia seca y de absorción para evaluar la dinámica nutrimental del potasio en especies con diferente densidad radical.

Hipótesis:

La cantidad de potasio que es absorbido por el cultivo, es función de su densidad radical, así como de la velocidad e intensidad con la que es adsorbido por la matriz arcillosa del suelo o sustrato empleado; es decir; de la capacidad amortiguadora de potasio de éste.



III.- REVISION DE LITERATURA

3.1 Antecedentes

La aplicación de fertilizantes en los sistemas de producción agrícola ha contribuido esencialmente a incrementar la producción mundial de alimentos; particularmente el N, P y K, han elevado los rendimientos de los cultivos (Loneragan, 1997). Para entender la fertilidad del suelo se deben conocer los factores que limitan o mantienen la productividad, uno de los cuales es la dinámica nutrimental de los nutrientes, muy particular del Potasio (K), porque se sabe que en agricultura intensiva el aporte de K de los suelos no siempre es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Aun cuando el contenido de K total del suelo puede ser 4% o más (Mutscher, 1997), este tipo de K no se relaciona directamente con el K disponible para las plantas.

El K es considerado en la nutrición de cultivos, como un macronutriente esencial, que si bien, no forma parte estructural de una planta, desempeña diferentes funciones fisiológicas y bioquímicas, las cuales repercuten en el crecimiento y desarrollo vegetal (Mengel y Kirkby, 1980 y Marschner, 1986). Los contenidos de potasio en el tejido foliar varían de 1 a 5% y los valores en el rango de suficiencia en hojas recientemente maduras oscilan de 1.5 a 3%. Sin embargo, cuando se presentan excesos en la absorción de K, los valores pueden exceder de dos a tres veces el valor de suficiencia, alcanzando niveles de 6 a 8% en tallos de algunas hortalizas. Obviamente, los valores varían considerablemente entre especies, estado de crecimiento y parte de la planta



que sea analizada (Benton, *et al*, 1991). Cuando el K es deficiente, se retarda el crecimiento y es traslocado de las hojas maduras a tejidos más jóvenes.

A diferencia de otros nutrientes esenciales, el K no se combina con otros elementos para formar parte estructural como protoplasma, grasas, celulosa, hemicelulosa y lignina. Las evidencias indican que el potasio se encuentra en forma iónica como K^+ por lo que es sumamente móvil y es el catión más abundante en la savia del floema, llegando a constituir hasta el 80% de la suma de los cationes (Mengel y Kirkby, 1980). El K está involucrado en diferentes procesos en la planta como son:

Activación enzimática. Las enzimas están involucradas en muchos procesos fisiológicos de las plantas y más de 80 sistemas enzimáticos requieren la participación del K^+ para su activación (Havlin *et al.*, 1999). Muchas de estas enzimas que son estimuladas por el K^+ están involucradas en el metabolismo del fosfato (Evans y Sorger, 1966), como es el caso de la fosfatasa (Besford, 1975).

La enzima ribulosa-1,5-difosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco), disminuye en cantidad y actividad en ausencia de un suministro adecuado de K a nivel de campo, en trigo y tomate (Osaki *et al.*, 1993). Otras enzimas importantes en donde actúa el potasio como activador son: almidón sintetasa, fosforilasa, ADP glucosa pirofosforilasa y las enzimas que participan en la síntesis de proteínas; además, es muy probable que en otros sistemas enzimáticos con requerimientos de cationes univalentes el potasio también participe (Mengel y



Kirkby, 1980; Marschner, 1986). Existen diferentes mecanismos de activación enzimática y al parecer el efecto principal de esta activación es en la formación de proteínas. Mediante la presencia de K^+ u otro catión univalente activador, el sitio activo de la enzima se muestra disponible para atrapar el sustrato; asimismo, la posible distribución del K^+ en la célula además de su disponibilidad para la activación, puede influenciar las rutas metabólicas del sustrato y por ello jugar un papel importante en el control del crecimiento, diferenciación y desarrollo de organismos vivos (Wilson y Evans, 1968).

Desde un punto de vista práctico, lo anterior significa que las plantas pobremente abastecidas con potasio pueden disminuir su metabolismo por la falta de ATP, lo cual deteriora la síntesis de polímeros como almidón, celulosa y ácidos nucleicos (Mengel y Kirkby, 1980).

Síntesis de proteínas. Se ha establecido que el K^+ es requerido para la síntesis de proteínas, habiéndose demostrado por la acumulación de componentes nitrogenados solubles como son: aminoácidos libres, aminas y nitratos en plantas deficientes de potasio (Marschner, 1986). Por su parte, Besford (1975) determinó que las concentraciones de proteínas solamente se redujeron en tejidos de hojas de tomate extremadamente deficientes de potasio. En caña de azúcar, las plantas con deficiencia de potasio acumulan mayores cantidades de nitrógeno no proteico, y en ciertos pastos, se ha cuantificado mayor contenido de nitrógeno en forma de amidas y menor conversión a proteínas (Tisdale *et al.*, 1990).



Síntesis de almidón. La síntesis de almidón está controlada por la enzima almidón sintetasa, misma que incorpora las moléculas de glucosa a cadenas largas de almidón. A su vez, la activación de esta enzima requiere de la participación de K, por lo que la falta de un buen abastecimiento de K repercute en la síntesis de almidón, siendo esto un aspecto importante en el llenado de grano en cereales y órganos de almacenamiento como papaya y yuca (Liebhardt, 1969).

Energía metabólica. Las plantas a través del proceso fotosintético convierten la energía lumínica en energía química, y el mecanismo básico de metabolismo energético implica la producción de adenosintrifosfato (ATP) y nicotin-adenin-dinucleótido fosfato reducido (NADPH) durante el proceso de la foto fosforilación en el cloroplasto. El K^+ es el ion dominante que induce el flujo de H^+ a través de la membrana del tilacoide y genera así, un gradiente de pH transmembranario necesario para la síntesis de ATP (Marschner, 1986). De esta manera la importancia del K, queda enmarcada en el sentido de que el ATP y NADPH son necesariamente requeridos en todos los procesos metabólicos que involucran el empleo de energía, tales como la síntesis de proteínas, azúcares y polisacáridos. Posiblemente, esto permita explicar el hecho de que el 50% de potasio encontrado en las hojas este localizado a nivel de los cloroplastos (Tisdale *et al.*, 1990).

Fotosíntesis. El incremento en la tasa de fotosíntesis debido al K, puede ser atribuido a su posible función como promotor en la síntesis de la enzima Rubisco y a la reducción en la resistencia a la difusión de CO_2 , tanto en



estomas como en el mesófilo de las hojas (Egilla y Davies, 1995, Osaki *et al.*, 1993). Asimismo una disminución en el contenido de K en las hojas conllevan a una compactación de la estructura y arreglo celular y a una degradación de los cloroplastos (O'Toole *et al.*, 1980).

Procesos de osmoregulación. El potasio es considerado como el soluto inorgánico más importante en los procesos de osmoregulación celular, lo cual afecta el tamaño celular y la apertura y cierre de estomas. El contenido de K^+ al acumularse en las células guarda de los estomas ocasiona un incremento en la presión osmótica, haciendo posible la apertura de los estomas y en consecuencia la difusión de CO_2 al interior de los tejidos; cuando las células guarda desacumulan en contenido de iones K^+ , pierden turgencia dando lugar al cierre de estomas (Marschner, 1986).

Traslocación de asimilados. La traslocación de sustancias en la planta implica el movimiento de agua, iones inorgánicos y productos orgánicos derivados de la fotosíntesis en el xilema y floema del sistema conductor de la planta (Liebhardt, 1969). Los principales constituyentes orgánicos de la savia del floema son azúcares, principalmente sacarosa y aminoácidos. Debido a ello, el potasio tiene un impacto directo sobre el transporte de N a larga distancia, lo cual puede ser relevante en la producción de cultivos. El efecto del K en el transporte de fotosintatos ha sido demostrado en varias especies vegetales como es el caso del frijol, caña de azúcar, algodón, betabel, papa, y tomate; la dirección del flujo puede ser acropétala y basipétala (Mengel y Kirkby, 1980).



Otros. Algunos estudios indican que una apropiada fertilización potásica puede proteger a los cultivos del ataque de ciertas enfermedades y disminuir los daños por frío (Goss, 1968). Esto último parece estar relacionado con el grado de hidratación que presentan los tejidos al nivel de potasio. Sweeney *et al.* (2000), indican que la fertilización potásica redujo la severidad del ataque de la roya en trigo e incremento el peso de los granos, pero también señalan que esta respuesta podría estar asociada con los iones Cl^- provenientes de abonos de KCl. Otro aspecto de importancia agrícola del potasio es su influencia en la calidad de los productos cosechados.

3.2 Generalidades de los Sustratos con fines agrícolas

Un sustrato se define como el medio adecuado para el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas. Para obtener buenos resultados, un sustrato debe tener las siguientes características: proporcionar suficiente humedad y tener un buen drenaje, permitir el intercambio gaseoso, estar libre de patógenos y no tener exceso de sales (Hartman y Kester 1992 citado por Arias, 1998). Una clasificación de los sustratos por su origen, se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro1. Clasificación de los sustratos de uso agrícola

MATERIALES INORGANICOS		MATERIALES ORGÁNICOS
NATURALES	SINTETICOS	Turba (Peat Moss)
Agrolita	Fibra de coco	Aserrín
Arena	Poliuretano	Compostas
Perlita	Poliestirenos	Acícula de pino
Vermiculita	Espuma de formaldehido	Cascarillas de arroz
Arcilla expandida		Fibra de coco
Tezontle		
Zeolita		

Fuente: Vendonk, 1981 citado por Arias (1998)



Se denomina sustrato a un medio sólido inerte que cumple dos funciones esenciales: 1) Anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles respirar, 2) Contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan.

Los gránulos, componentes del sustrato deben permitir la circulación del aire y de la solución nutritiva. Se consideran buenos sustratos, aquellos que permiten la presencia entre 15% y 35% de aire y entre 20% y 60% de agua en relación con el volumen total. Valdivia (1989) reportó que partículas inferiores a 0.25mm, tienen una gran influencia en la retención excesiva de humedad, creando problemas de aireación, además de que los sustratos que presentan una proporción por arriba del 15 % de este tamaño, se compactan demasiado.

En el mismo sentido este autor reportó que cada sustrato se comporta de manera diferente en la retención de humedad, aun cuando sus características de densidad aparente y porosidad coincidan en sus valores. Muchas veces es útil mezclar sustratos buscando que unos aporten lo que les falta a otros, teniendo en cuenta los siguientes aspectos: Retención de humedad, alto porcentaje de aireación, físicamente estable, químicamente inerte, excelente drenaje, poseer capilaridad, liviano, de bajo costo y alta disponibilidad. Los sustratos a diferencia de los suelos naturales, son capaces de retener agua a bajas tensiones sin detrimento de su capacidad de aireación (Burés, 1997).

Un sustrato al igual que el suelo mineral, está compuesto por tres fases: la sólida, la líquida y la gaseosa, solo que en diferentes proporciones. Las



proporciones de la fase sólida, líquida y gaseosa en un sustrato varían con la naturaleza del medio y con las condiciones exteriores como, drenaje, temperatura, humedad, etc., (Ansorena, 1994).

Las funciones de regulación del suministro de agua y aire de los suelos y sustratos están en relación directa con su porosidad y capacidad de retención de agua, lo que modifica la velocidad de drenaje rápido y aireación. Al hablar de los suelos se tiene como unidad de estudio al perfil o sucesión de capas llamadas horizontes; la forma es que están dispuestas y el material que la constituyen afectan tanto al crecimiento de la raíz como al movimiento y retención de agua en el suelo, por esto es necesario considerar algunas propiedades físicas con el fin de lograr entender la relación existente entre suelo y otros factores como el agua, la planta y la atmósfera, (Aguilera y Martínez, 1996).

Las características físicas tanto de los suelos como de los sustratos son de gran importancia para el normal desarrollo de la planta, pues determinarán la disponibilidad de oxígeno, la movilidad del agua y la facilidad para la penetración de la raíz. Un aspecto que se debe tener en consideración al referirse a las características físicas de un sustrato o de un medio para el desarrollo de la planta, es la imposibilidad de modificar alguna de estas propiedades posteriormente a la colocación de la planta dentro del contenedor. En general, las propiedades físicas de un suelo o de un sustrato no pueden predecirse, de forma sencilla, a partir de las características de los materiales que lo conforman, pues éstos varían significativamente de una zona a otra.



Además, las mezclas de los distintos materiales producen complejas interacciones que alteran las propiedades físicas de la mezcla final (Ansorena, 1994).

Las propiedades de los sustratos, así como su determinación, se han vuelto más importantes a medida que han aumentado la cantidad de nuevos materiales empleados en su conformación (Verdoncket *et al.*, 1983). Estos incluyen materiales orgánicos como cortezas, chips de madera, compost de diversos orígenes, fibras de coco y subproductos agroindustriales (Molitor *et al.*, 2004).

3.2.1 Propiedades físicas de los sustratos

- **Densidad aparente**

Se denomina densidad aparente de un sustrato, al peso seco del mismo por unidad de volumen que incluyen todos los espacios ocupados por aire y materiales orgánicos. Esta característica es frecuentemente utilizada para estimar la capacidad total de almacenaje del medio de cultivo y su grado de compactación (Hillel, 1982; Miller and Donahue, 1995; Ansorena, 1994).

Un sustrato con baja densidad aparente resulta económicamente beneficioso, debido a que mejora significativamente la capacidad operacional del medio de cultivo, disminuyendo los costos de transporte y manipulación de materiales (Abad, 1993b).



- **Porosidad**

La porosidad de un sustrato consiste en el volumen total que no está siendo ocupado por partículas sólidas, minerales u orgánicas (Hillel, 1982; Burés, 1997). La administración de los flujos de agua y aire dentro de un sustrato dependerán, principalmente, de la calidad del espacio poroso del medio. Sin embargo, no es suficiente que el sustrato posea una elevada porosidad total, sino que es necesario que ésta se encuentre convenientemente repartida entre poros de gran tamaño o macroporos, que se hallan ocupados por aire, y poros de menor tamaño o microporos que alojan agua en su interior (Ansorena, 1994). Al igual que en pleno suelo, los poros en un sustrato están determinados por la irregularidad en la forma de sus partículas primarias y agregados, implicando una alta heterogeneidad en el tamaño, forma y dirección de los mismos (Miller y Donahue, 1995).

- **Aireación**

Todas las plantas necesitan oxígeno para respirar. Desde el punto de vista de la planta una condición óptima es aquella donde el intercambio gaseoso con la atmósfera es rápido. Tasas de intercambio por sobre los $40 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ resultan suficientes para la mayoría de las especies cultivadas (Miller y Donahue, 1995; Nelson, 1998). El tipo de material utilizado, el tamaño y continuidad de sus poros, la temperatura, profundidad, humedad y actividad microbiológica de los sustratos, son aspectos que deben considerarse para entender la dinámica de los gases dentro de un medio de cultivo. La utilización



de sustratos en contenedores de volumen reducido modifica las propiedades de aireación y retención de agua del medio, afectando el normal crecimiento y desarrollo de las plantas (Nicolas y Cruziat, 1992; Hsu *et al*, 1996).

Múltiples investigaciones han encontrado importantes diferencias en la capacidad de intercambio gaseoso al modificar la naturaleza de los materiales del sustrato. Sustratos a base de cortezas, fibras de madera, perlita y turba, han mostrado algún grado de dificultad al paso del aire, debido al pequeño tamaño o discontinuidad de sus poros (Caron *et al*, 1999).

- **Capacidad de adsorción de agua**

El agua cumple un papel fundamental en la dinámica del continuo sustrato-planta-atmósfera, debido a su participación en la mayoría de los procesos metabólicos de la planta. Junto con esto, el agua favorece la penetración de las raíces, a través de la lubricación del sustrato, y permite la absorción de los nutrientes. Dentro de un sustrato, el agua es retenida de dos formas, como una delgada película que envuelve las partículas y agregados, adsorción, o en fase líquida dentro de los poros de menor tamaño (Hillel, 1982).

La cantidad total de agua retenida por un sustrato en un contenedor dependerá de la proporción de poros de pequeño tamaño y del volumen del contenedor. Sin embargo, aunque la retención de agua sea elevada, puede ocurrir que una parte de ésta se encuentre adsorbida a las partículas del sustrato con una fuerza superior a la succión o tensión que la planta es capaz de ejercer, por lo



que no se encontrará disponible. Interesa conocer, por tanto, la cantidad de agua disponible en el sustrato, la que dependerá del tamaño de los poros más pequeños y de la concentración de sales en la solución acuosa (Ansorena, 1994).

Así, se denomina agua fácilmente disponible a la diferencia en la cantidad de agua retenida por el sustrato después de haberlo saturado y drenado libremente a 10 cm de tensión mátrica, menos la cantidad de agua presente en dicho medio a una tensión de 50 cm. Por lo tanto, un sustrato será considerado como adecuado, cuando el agua fácilmente disponible fluctúe entre 20 a 30 % del volumen total del agua del medio (De Boodt *et al*, 1974).

Un sustrato puede presentar una pobre retención de agua fácilmente disponible cuándo: 1) Su porosidad total es baja, 2) Los poros son grandes y gran parte del agua se pierde por gravedad, 3) Los poros son muy pequeños y la planta no es capaz de extraer una parte importante del agua, 4) Existe una elevada concentración de sales en la solución acuosa y 5) Una combinación de las situaciones anteriores (Abad, 1993; Ansorena, 1994).

3.2.2 Propiedades químicas de los sustratos

Las propiedades químicas del suelo representan una conexión esencial entre las consideraciones de fertilidad de los aspectos físicos del suelo. Las reacciones que aseguran la existencia de soluciones diluidas de nutrimentos, son indispensables para el crecimiento de las plantas (Thompson, 1998).



- pH

EL pH es la característica química mas importante en la determinación del ambiente químico de las plantas y de los microorganismos presentes en el suelo (Brady, 1999). El pH del suelo es el resultado de reacciones químicas complejas donde se suceden disociaciones iónicas que obrando en distintos sentidos dan como resultado final el pH del suelo .Un cambio notable en el pH, indica sin duda una modificación radical en el ambiente del suelo, sobre todo respecto al aprovechamiento de nutrientes (Ortiz, 1990).

Y si este ambiente fluctúa muy ampliamente, las plantas superiores y los microorganismos, sin duda alguna, sufrirán seriamente antes de que puedan adecuarse a él. No solo quedarán afectados directamente por el cambio de la concentración de iones H^+ , sino también indirectamente por las influencias sobre los nutrimentos que pueden llegar a ser inadecuados (Figura 1). Con frecuencia se dice que un pH de 6.5 es ideal para la mayoría de los cultivos, porque presenta el mejor acomodo en lo que concierne al efecto del pH sobre la disponibilidad de los nutrimentos (Ortiz, 1990).

En realidad el mejor pH para un cultivo particular, que también crece en un tipo particular de suelo, depende de muchos factores, entre los cuales se tienen: las necesidades del cultivo, las características del suelo y el contenido de sales de la suspensión suelo-agua (Aguilera y Martínez, 1996).

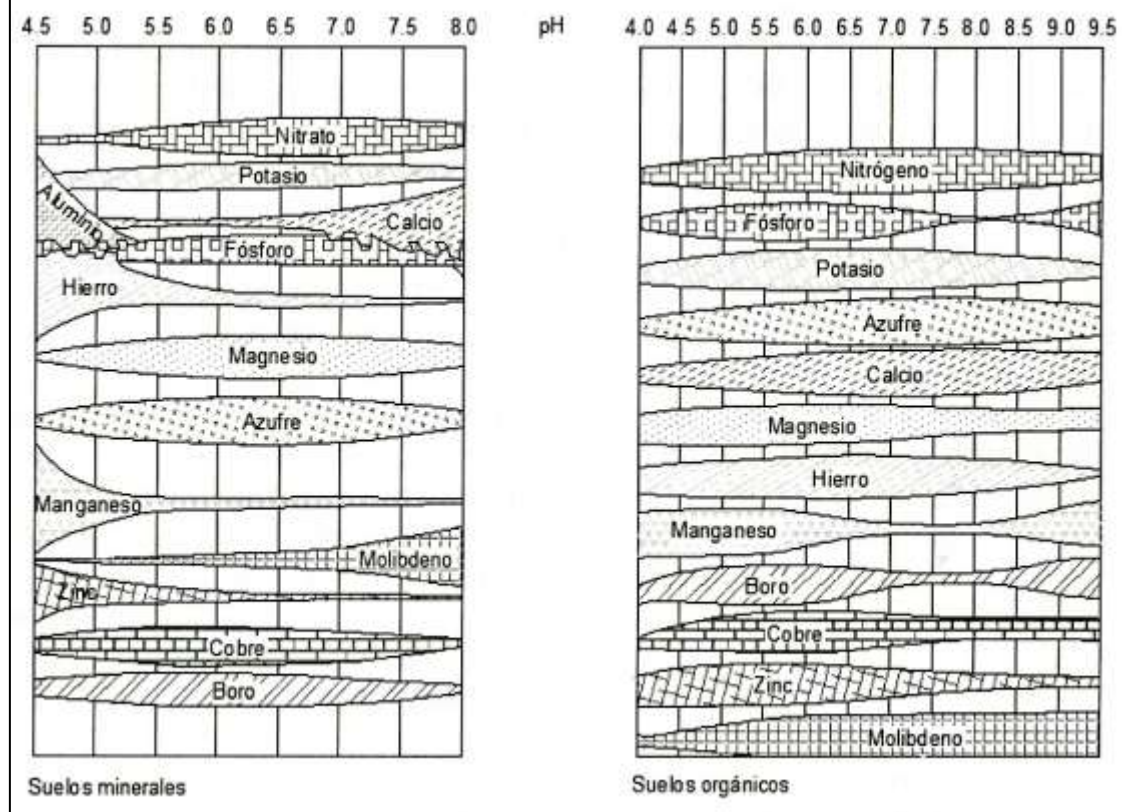


Figura 1. Relación entre pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes

En las regiones áridas el pH del suelo es generalmente más elevado que en las húmedas por las razones siguientes:

- ✓ Aportaciones orgánicas casi siempre inferiores a las de los climas lluviosos.
- ✓ Menos actividad microbiana por escasear la humedad y las aportaciones vegetales.
- ✓ Menor percolación y drenaje que producen pequeñas pérdidas de Ca y Mg.
- ✓ Precipitaciones que no drenan, pero que son capaces de elevar por capilaridad las sales disueltas haciéndolas pasar de los horizontes inferiores a los superiores.



Aunque con algunas modalidades adicionales, se deduce que el agua es el principal factor de la reacción del suelo ya que su abundancia o escasez produce los principales efectos sobre el pH. La lluvia, el drenaje, la naturaleza del material madre, la cantidad y calidad del agua de riego usada y el periodo de tiempo en que ha estado bajo cultivo el terreno son los factores principales que influyen en la reacción del suelo (Ortiz, 1990).

La cantidad de Fe, Al y Mn soluble en muchos suelos aumenta con la acidez. Aunque el Fe-ferroso es más bien toxico para muchas plantas, el Fe-férrico no es tan detrimental. El Al soluble por otra parte tiene una alta toxicidad para muchos de los cultivos comunes. En algunos suelos, el Al soluble presente ha mostrado ser el responsable por la mayor parte de la toxicidad en algunos cultivos. Generalmente, se cree que las concentraciones toxicas del Al y Mn son el factor principal que contribuye con el pobre desarrollo en suelos fuertemente ácidos. Tanto el Fe como el Al forman compuestos de baja solubilidad con los fosfatos en suelos ácidos. De un pH alrededor de 5.0 hasta el punto neutro, los fosfatos del suelo tienen una apreciable solubilidad debido a la presencia de iones básicos que mantienen más alto el pH y, al mismo tiempo, por los fosfatos de Ca y Mg en el suelo. En los suelos de pH 5.0 hacia abajo, los fosfatos complejos de Fe y Al se pueden formar, pero por su baja solubilidad no proporcionan fosforo para las plantas. Los fosfatos de Ca y Mg son mas solubles en presencia de CO₂ el cual proviene de la materia orgánica en descomposición, pero este efecto de solubilidad decrece desde el pH de 8.0 (Ortiz, 1990).



Conocer como se controla el pH, su influencia en el suministro y disponibilidad de los nutrimentos esenciales para las plantas, así como los elementos tóxicos y sus niveles de toxicidad, como afecta el crecimiento de las plantas y a los seres humanos, y como puede ser mejorado es esencial para la conservación y manejo sostenible del suelo (Ortiz, 1990).

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica ha sido el parámetro más extendido y el más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución.

El agua pura es un mal conductor de electricidad, pero la conductividad puede incrementar cuando se encuentran sales disueltas en ella. Así, la conductividad eléctrica de la solución del suelo nos arroja una medida indirecta del contenido de sales en el suelo (Brady, 1999).

Según Mass y Hoffman (1976) citados por Aguilera y Martínez (1996), la concentración de sales en el suelo, usualmente se determina midiendo la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo obtenido en la zona radical activa. Aunque la conductividad eléctrica puede determinarse rutinaria y repetidamente en el laboratorio, mediciones in situ del contenido de sales de la solución del suelo, son preferibles.



Como la distribución de sales en el suelo usualmente varía en dos dimensiones, espacio y tiempo, es importante saber cuando y donde tomar las mediciones, con el fin de obtener datos confiables sobre el grado de salinidad de dicho suelos. Debido a que la conductividad eléctrica es influenciada por la salinidad y el contenido de agua en el suelo, las mediciones en campo deberían hacerse cuando el suelo este en condición cercana a la capacidad de campo. En suelos irrigados, las mediciones son mas fáciles de realizar después de aplicar el riego para asegurar altos niveles de humedad (Brady, 1999).

- **Intercambio catiónico**

Se entiende por cambio iónico (catiónico o aniónico) los procesos reversibles por los cuales las partículas solidas del suelo adsorben iones en la fase acuosa, y al mismo tiempo liberan cantidades equivalentes de otros iones en la fase solida y establecen un equilibrio entre ambas fases (Marshall, 1979; Flores, 1980). Porta (1999) señala que la existencia de superficies cargadas negativamente exige que haya iones de signo contrario, relacionados con tales superficies, para que se cumpla el principio de electro neutralidad del sistema.

Así mismo, Aguirre (2001) menciona que la electro neutralidad del sistema, se satisface a través de la presencia de un exceso de cationes, relativos a los aniones presentes, que se encuentran en cercana proximidad a la superficie solida mineral y/u orgánica. Estos cationes no pueden, en forma neta, ser extraídos del sistema, sino haber sido intercambiados por otros de mayor preferencia, manteniendo siempre la electro neutralidad del sistema a través de



los cationes reemplazantes. De esta manera, por ejemplo, cationes nutritivos como el K^+ y el Ca^{2+} se encuentran disponibles para los cultivos que los asimilan, intercambiándolos por los iones H^+ liberados, a su vez, por el sistema radicular de la planta.

De acuerdo con Hillel (1998), la propiedad del suelo de poder intercambiar iones en la interfase sólido-líquido, y en concreto el tipo y clase de intercambio, tiene grandes repercusiones en el comportamiento del suelo tales como:

- ✓ Control de la disponibilidad de nutrientes para las plantas (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , entre otros).
- ✓ Interviene en los procesos de floculación y dispersión de las arcillas y por consiguiente en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados.
- ✓ Determina el papel del suelo como depurador natural a permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo.

Aguirre (2001) alude que el intercambio catiónico hace posible que los cationes introducidos al sistema por actividades de fertilización (por ejemplo K^+ , NH_4^+), encalado (Ca^{2+} , Mg^{2+}), salinización (Na^+), contaminación (Pb^{2+} , Cd) puedan ser retenidos por el suelo.

El intercambio catiónico tiene efectos benéficos sobre la fertilidad del suelo, reteniendo, por ejemplo, iones que de otra manera serían lixiviados por el agua de lluvia o riego, o bien, a través de la preferencia de adsorción, algunos



metales pesados indeseados pueden también ser convenientemente retenidos evitando su transporte a las aguas subterráneas. Por otro lado, la adsorción excesiva de ciertos cationes (Na^+ por ejemplo) puede alterar el ambiente creando condiciones nocivas para los cultivos, a través de procesos como la salinización y/o sodificación.

La cantidad de cationes intercambiables se determina con la capacidad de intercambio catiónico (CIC). La CIC es una medida de las cargas negativas presentes en las superficies minerales y orgánicas del suelo que están disponibles para retener e intercambiar cationes, es decir, el número de sitios de adsorción de cationes por unidad de peso de suelo (Figura 2). Esta propiedad se define como la suma total de cationes intercambiables que el suelo puede absorber (Brady, 1999).

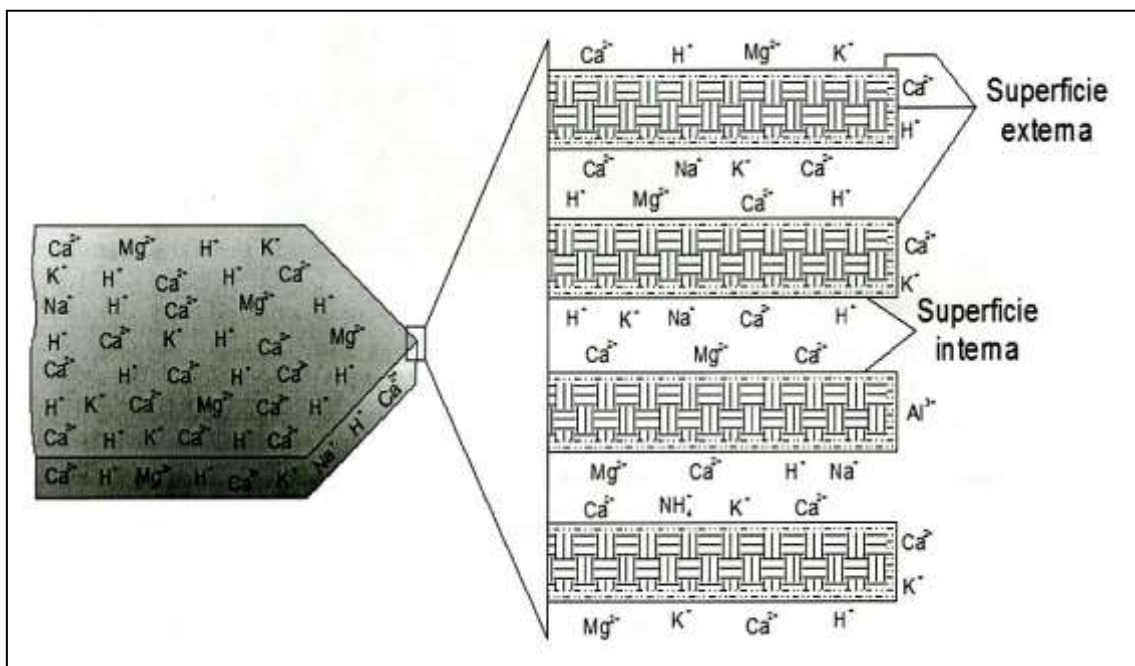


Figura 2. Representación de la arcilla y los iones presentes tanto absorbidos en la arcilla como en la solución del suelo.



La capacidad de intercambio catiónico está regida principalmente por los desequilibrios de carga que se producen en las capas de la arcilla, estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- ✓ Sustituciones isomorfas dentro de la estructura.
- ✓ Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- ✓ Disociación de los grupos hidroxilos accesibles

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un gran porcentaje de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica, corresponden a bordes cristalinos químicamente activos, y representan muy poco porcentaje de la carga total de la lamina en un suelo con arcilla del tipo 2:1, aunque en otros tipos de suelo representa una cantidad considerable (Jury, 1991).

La capacidad de intercambio catiónico no solo depende de la cantidad, sino también del tipo de arcilla presente en el suelo (Figura 3.), ya que las principales características que definen a la arcilla es la superficie específica y por consiguiente el número total de cargas negativas presentes en el complejo coloidal (Hillel, 1998). Por lo tanto, se tiene que tomar muy en cuenta el tipo de arcilla, ya que un suelo arcilloso con arcilla del tipo 1:1 presenta menor CIC que un suelo arcilloso del tipo 2:1.

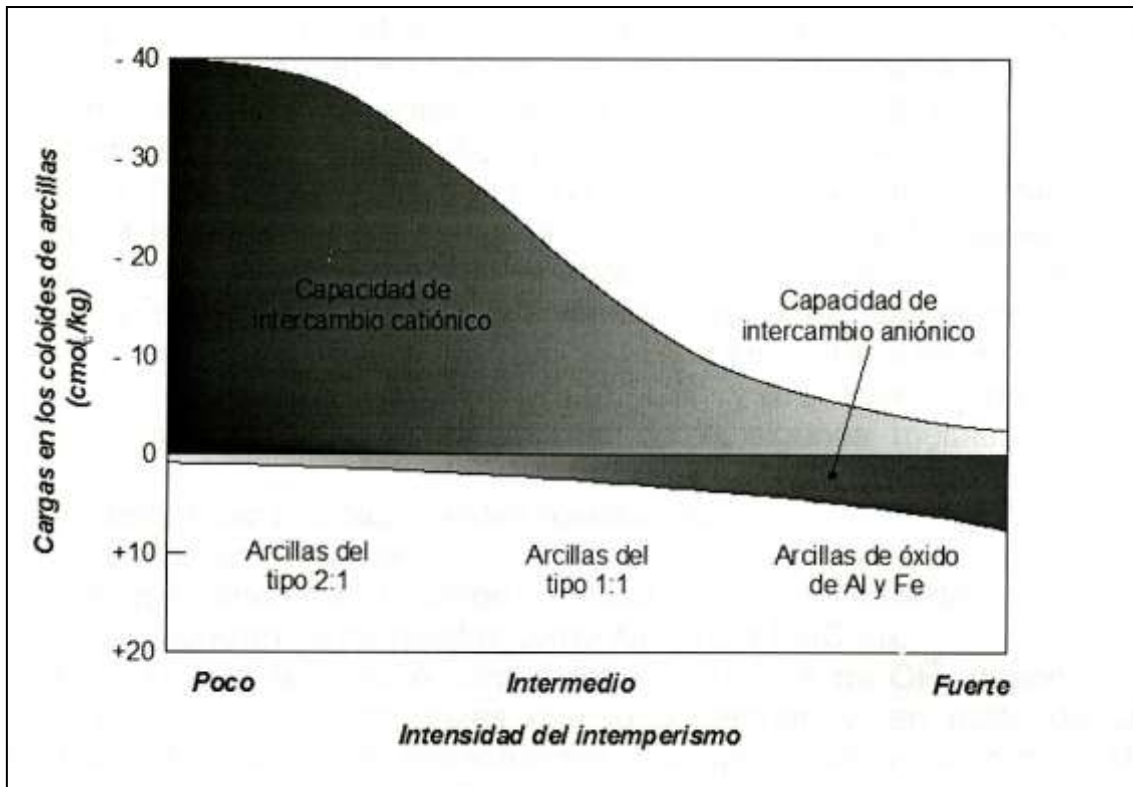
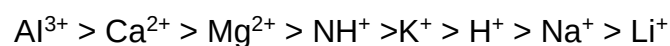


Figura 3. Influencia del tipo de arcilla en la capacidad de intercambio catiónico.

Debido a las diferencias en las valencias, radio iónico y propiedades de hidratación, los cationes pueden ser adsorbidos con diferentes grados de tenacidad. En general, los cationes con pequeños radios iónicos y valencias grandes son los que están más fuertemente retenidos (Ortega, 1981). El orden de preferencia en las reacciones de intercambio se muestra a continuación:



Brady (1999) menciona que en terrenos de regiones húmedas (ácidos), la capacidad de intercambio catiónico está parcialmente saturada de iones de hidrogeno y aluminio, mientras que en suelos de regiones áridas (alcalinos), principalmente de bases como calcio, potasio y magnesio. Los cationes que



dominan el complejo de intercambio tienen gran influencia en las propiedades del suelo. Un suelo con alta CIC puede retener una gran cantidad de cationes en los lugares de intercambio que pueden ser cedidos a la solución del suelo y asimilados por las plantas. Los nutrimentos aplicados al suelo que puedan exceder esa cantidad pueden fácilmente ser lavados por el exceso de lluvia o por el agua de riego. Esto implica que suelos con baja CIC (en general suelos con escaso contenido de arcilla) necesitan un manejo diferente en lo que se refiere a la aplicación de fertilizantes, con pequeñas dosis de nutrimentos aplicadas frecuentemente.

- **Intercambio aniónico**

Los suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos o los suelos ácidos de zonas tropicales, y en general, aquellos que tienen cargas variables pueden presentar capacidad de adsorber aniones. Esta es mayor en suelos que contienen cantidades importantes de óxidos de aluminio, de hierro y constituyentes tales como la alófana (Parfitt, 1978) o imogolita (Mizota, 1977). Los suelos con arcillas caoliníticas en condiciones de acidez puede presentar carga eléctrica positiva al desarrollarla en los bordes de las partículas de arcilla (Porta, 1999).

De acuerdo con Bohn (1993) y Ortega (1981) la capacidad de retención aniónica y molecular de la mayoría de los suelos es mucho menor que la capacidad de retención catiónica. Sin embargo para la agricultura son primordiales un grupo considerable de especies catiónicas y aniónicas, así



como su relación con el sistema suelo-agua. Las formas en las que podemos encontrar a algunos aniones son Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , SO_4^{2-} , H_2PO_4^- , OH^- y F^- , además de algunos micronutrientes como H_2BO_3^- y MoO_4^{2-} , así como algunos metales pesados ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). Los sitios de intercambio aniónico pueden resultar de:

- ✓ Grupos amina en el humus.
- ✓ Enlaces terminando con un catión en el borde de un mineral de arcilla.
- ✓ OH^- que se ionizan de materiales como $\text{Al}(\text{OH})_3$ o $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

La probabilidad de que se ionicen cantidades importantes de OH^- depende, en parte, de la abundancia de minerales que lo contengan y, en parte del pH. Aumenta en suelos seniles muy meteorizados y lavados, porque los compuestos de Al y Fe tienden a acumularse en ellos y porque en condiciones acidas, la mayor parte del OH^- ionizado se combina con H^+ para formar agua (Thompson, 1988). Brady (1999) contrasta la capacidad de intercambio aniónico contra la capacidad de intercambio catiónico, la cual aumenta con el incremento del pH, además Ortiz (1991) señala que la mayoría de los suelos agrícolas tienen valores de pH en el cual la adsorción de aniones se manifiesta al mínimo, por lo que con excepción de los fosfatos y sulfatos en menor grado, los aniones e su mayor parte son perdidos por lixiviación. Así también, menciona que el intercambio de aniones es mayor en los suelos con alto contenido de arcillas del tipo 1:1 y óxidos hidratados de Fe y Al, lo cual se puede corroborar en la. Los aniones y cationes pueden combinarse para dar sales insolubles con las cuales el producto de solubilidad del par de iones que



constituyen la sal es tan bajo que cada ion puede disolverse solo lentamente bajo condiciones normales del suelo. Las variaciones en la arquitectura del látice cristalino de la sal pueden también influir en la proporción de solubilización de sus iones. La adsorción de aniones puede afectar a la nutrición de las plantas al no estar en disposición de estos iones tales como el fosfato, sulfato y otros. Para determinar las dosis de fertilizantes en suelos con propiedades de este tipo hay que considerar la capacidad del suelo para retenerlos en formas total o parcialmente inasimilables, además de tener en cuenta los requerimientos de las plantas, en cuanto a cantidades y momentos. Las necesidades pueden ser más elevadas al comienzo del periodo vegetativo que en las etapas de floración y fructificación (Fox y Kamprath, 1970 citados por Porta, 1999).

3.3 Dinámica del Potasio en suelos y sustratos

Alrededor del 80% de la producción hortícola bajo cubiertas plásticas se lleva a cabo en suelo (Castellanos, 2004) y la restante en algún tipo de sustrato inerte. Las ventajas del cultivo en suelo son: amortigua interrupciones temporales de agua y nutrimentos, sin afectar seriamente su desarrollo, e incrementa la eficiencia en el uso de nutrimentos y agua (Villarreal *et al.*, 2002), comparado con el uso de sustrato que requiere de 20 a 30% más de riego para evitar acumulación de sales en el medio de cultivo, lo que significa pérdida de agua y nutrimentos (Papadopoulos, 1991).



Una desventaja importante del cultivo en suelo es la presencia de enfermedades, debido a que el agricultor repite año tras año los mismos cultivos en el mismo terreno. Actualmente, hay un renovado interés en la producción en suelo y tiene que ver con el reciente surgimiento de la técnica de injerto en hortalizas que se está imponiendo en el mundo bajo condiciones protegidas, como una estrategia para enfrentar las enfermedades provenientes del suelo (Camacho-Ferre y Tello-Marquina, 2006); así, las enfermedades pasan a ser un problema de menor relevancia y el cultivo en suelo es una posibilidad atractiva.

El uso de sustratos inertes se ha venido implantando en la producción de tomate en invernadero, con rendimientos de hasta 330 t ha⁻¹ cuando se utiliza lana de roca como sustrato (Hao y Papadoupulos, 2002), pero también hay pérdidas importantes de agua y nutrimentos por efecto del drenaje (Papadopoulos, 1991).

El uso de tezontle como medio de cultivo se ha estudiado en la producción de hortalizas (Baca *et al.*, 1991) desde hace unos 15 años. El tezontle es un material considerado como inerte desde el punto de vista químico, cuyo extracto de saturación tiene un pH próximo a la neutralidad, su capacidad de intercambio catiónico es muy baja, buena aireación, retención de humedad que varía con el diámetro de las partículas, generalmente está libre de sustancias tóxicas y tiene buena estabilidad física (Bastida, 1999), además de su bajo costo de adquisición (Castellanos y Vargas-Tapia, 2003).



Por ello ha crecido el interés en comparar diferentes sistemas y sustratos para la producción de tomate en invernadero, en cuanto a rendimiento y optimización en el uso del agua y nutrimentos (Inden y Torres, 2004).

El desarrollo de los sustratos hortícolas tiene su origen en la producción de cultivos en contenedores, donde se planteó la necesidad de un cambio conceptual con respecto al cultivo tradicional en suelo, apareciendo los sustratos en sus diversas variantes reemplazando el suelo natural. El énfasis del tipo de cultivos producidos bajo este tipo de sistemas esta puesto fundamentalmente en plantas altamente redituables desde el punto de vista económico, como es el caso de cierto tipo de hortalizas y plantas ornamentales, lo que ha originado un incremento sustancial en la demanda de sustratos para la producción de cultivos bajo condiciones de invernadero (Burés, 1997).

3.3.1 Formas y capacidad amortiguadora del Potasio

Desde 1933, con los trabajos de Hoagland y Martin, se reconoce a la fecha cuatro formas o reservorios de K en el suelo: K en la solución del suelo (K_s), K intercambiable (K_i), K no intercambiable (K_{ni}) y el K en la matriz de los minerales; sin embargo, los primeros tres reservorios son los que intervienen en la nutrición de los cultivos y consecuentemente la medición de estos reservorios y de los flujos que se establecen entre ellos, permitirán una mejor comprensión de las reservas de potasio y de su disponibilidad para las plantas.



De acuerdo con Rodríguez (1990), un esquema simplificado de la dinámica del potasio en el suelo se observa en la Figura 4.

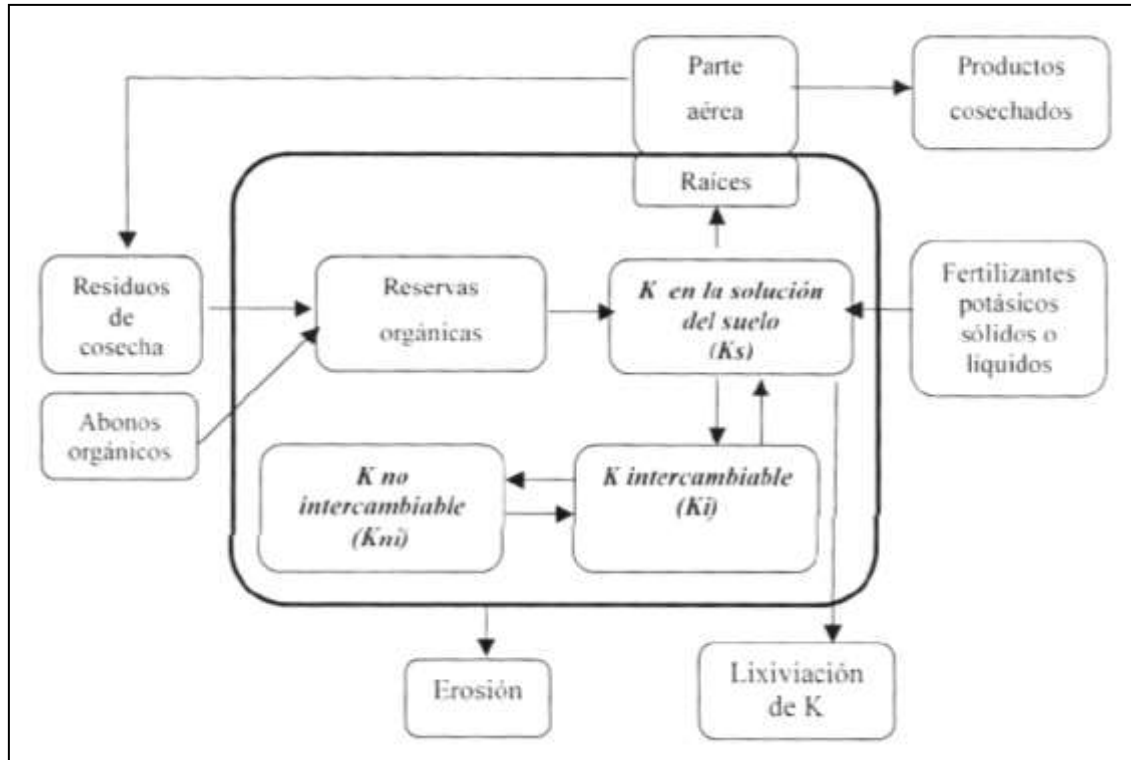


Figura 4. Esquema simplificado de la dinámica del K en el suelo en un sistema de producción agrícola.

La distinción de los diferentes reservorios es hasta cierto punto arbitrario y han sido establecidos experimentalmente usando técnicas de extracción, permitiendo definir la relativa disponibilidad de K para las plantas. A la fecha, no se ha encontrado una relación satisfactoria entre los cambios que suceden en estos reservorios y la absorción por los cultivos. La utilización de los diferentes reservorios por las plantas depende de la tasa de difusión con que se transporta el K desde el suelo a las raíces y además de la accesibilidad especial a partir de estas fracciones (Meyer y Jungk, 1993). La dirección del flujo de K está determinada por el grado de abatimiento que se presente en uno o más reservorios, tendiendo siempre hacia un equilibrio. Las entradas de K al



sistema suelo pueden provenir de las adiciones de fertilizantes potásicos, abonos orgánicos o residuos de cosecha incorporados al suelo; una vez que ha ocurrido la solubilización del fertilizante o liberación de K a partir de las reservas orgánicas disponibles, este pasa a formar parte del Ks incrementando su concentración, de esta manera se origina un flujo hacia los sitios de intercambio en las arcillas del suelo y posteriormente hacia el reservorio de K_{ni}.

Si existe un abatimiento en la concentración de Ks del suelo debida a la absorción efectuada por las plantas, entonces se producirá un flujo de K desde el K adsorbido en las posiciones de intercambio de las arcillas hacia la solución del suelo, lo cual origina a su vez la difusión del K_{ni} al K_i. Las salidas de K del sistema suelo están dadas por el K extraído por un cultivo, del cual una parte se pierde en los productos cosechados; la que queda en los residuos de cosecha pasa a formar parte de las reservas orgánicas del suelo.

Otros procesos que originan pérdidas de K son la erosión de suelo y la lixiviación de K. En la medida en que se conozca el balance entra las entradas y salidas de este nutrimento en el sistema suelo-planta y de los factores edafoclimáticos que influyen en esta relación, se podrá realizar un mejor manejo nutricional de los cultivos (Rodríguez y Galvis, 1989).

3.3.2 Potasio en la solución del suelo (K_s)

El k de la solución es aquel que se encuentra como ion K⁺ libre en la solución del suelo y por lo tanto, es a partir de este reservorio de donde las raíces de las



plantas lo absorben para satisfacer sus necesidades nutrimentales. Para su cuantificación en laboratorio, se utiliza una solución extractora de CaCl_2 0.01M (Novozamsky y Houba, 1987).

La concentración de K_s es muy variable, por lo que no parece ser un buen indicador de la cantidad extraída por un cultivo (Lumbanraja y Evangelou, 1992) y depende entre otras cosas del tipo de suelo, cantidad y tipo de arcilla, las condiciones de manejo del sistema de producción, humedad edáfica, estructura del suelo, nivel de fertilidad general, tasa de absorción de K por las plantas y la biomasa producida. Consecuentemente puede señalarse, que no existe una concentración adecuada de K_s para la producción de los cultivos, dado que esto será de acuerdo al sistema de producción de que se trate.

Cuando una planta absorbe K^+ de la solución del suelo, la cinética de liberación de K_i a la fase líquida es tan rápida que probablemente el K_i pueda considerarse que esté en equilibrio con la solución del suelo. Sin embargo, en un período de crecimiento muy activo de la planta, la raíz puede disminuir considerablemente en pocos días el K_s a niveles tan bajos como $3\text{-}5 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Meyer y Jungk, 1993), y por consiguiente también el K_i que se encuentra alrededor de ésta puede abatirse. De esta manera, el K_i debe ser repuesto a partir de la liberación de K_{ni} y/o por difusión de K_i desde otras regiones cercanas que en su momento no se han abatido (Kauffman y Bouldin, 1967).

Si a suelos con diferentes texturas y similares contenidos de K_i se agregan diversas cantidades de fertilizante potásico, la concentración de K_s variará de



acuerdo con las propiedades del suelo. Esto se debe a la diferente tasa de suministro de K a partir de los sitios de adsorción y de los espacios interlaminares de las arcillas; en otras palabras, a la capacidad amortiguadora del suelo para resistir esos cambios. La cantidad y tipo de arcilla influyen en esta propiedad (Wada y Odahara. 1993); otros factores como el pH y contenido de Al modifican la concentración de Ks. A medida que la concentración de K inicialmente es mayor en un suelo, la concentración de Ks tenderá a elevarse más fácilmente con las adiciones externas de K; sin embargo, se desconoce que tan rápido esta concentración puede elevarse por las aplicaciones de K en un determinado suelo. El rendimiento de los cultivos está altamente influenciado por la rapidez con que ocurra un abatimiento en la concentración de Ks, durante el período de crecimiento de un cultivo debido a la extracción que éste realiza (Németh. 1975).

3.3.3 Potasio intercambiable (Ki)

El Ki es aquel que se encuentra en las posiciones de intercambio de las arcillas y su medición constituye un procedimiento generalizado para evaluar el suministro edáfico de K. Esta fracción de K es extraída con una solución de NH_4OAc IN, pH 7.0 en una relación 1:10 suelo: extractante y sus concentraciones en el suelo varían de <100 a 2000 ppm o más (Knudsen *et al.*, 1989). En Inceptisoles y Oxisoles es frecuente encontrar valores de Ki tan bajos como < 0.1 cmol(+) kg⁻¹ (Bekker *et al.*, 1994). El Ki tiende a estar en equilibrio con el Ks y depende en gran medida del grado de selectividad de K⁺ en los sitios de adsorción de la fracción intercambiable de las arcillas. La



desorción de K_i a partir de las posiciones de intercambio es relativamente fácil, introduciendo iones NH_4^+ en la solución del suelo mediante agitación.

El equilibrio entre el K_s y el K_i , está controlado principalmente por el grado de selectividad de los sitios de adsorción en las posiciones de intercambio. Para el caso de las arcillas 1:1 y de la materia orgánica, existe una baja adsorción de K dado que presentan menor cantidad de cargas negativas en comparación con las arcillas 2:1 (Mengel, 1980). En un mineral de arcilla 2:1 pueden distinguirse tres sitios diferentes de adsorción: la superficie plana, la cual presenta baja selectividad de K ; los sitios de los bordes interlaminares, con selectividad media y los sitios internos entre las láminas de las arcillas, que presentan alta selectividad. Los iones K^+ ubicados en estos sitios internos constituyen el reservorio de K_{ni} , el cual no es desplazado fácilmente por otros cationes; por su parte el K ubicado en la superficie plana y los bordes interlaminares constituye el reservorio o "pool" de K_i (Mengel, 1980).

En vista de ello, el contenido de arcilla y de K_i , no dan por si solos una información satisfactoria de la disponibilidad de K , sino que deberá considerarse además el tipo de arcilla así como el contenido de Al soluble e intercambiable (Németh, 1975).

Las recomendaciones de fertilización potásica en los cultivos agrícolas están basadas en la medición de K_i y algunos investigadores proponen incluso un mínimo crítico de 110 ppm de K_i como punto decisivo para adicionar fertilizantes al suelo (Unruh *et al.* 1994) lo cual es objetable, puesto que aún



cuando diferentes tipos de suelos tengan el mismo nivel de K_i , el grado de disponibilidad varía ampliamente de un suelo arcilloso a un suelo franco o arenoso. Resulta entonces más conveniente no solamente determinar la cantidad de K_i , sino también la capacidad amortiguadora de K y la concentración de K en la solución del suelo, el cual constituye una medida directa de la disponibilidad de K y depende tanto del K_i como del contenido y tipo de arcilla o CIC. El K_s , refleja una condición momentánea de la disponibilidad de K , por lo que a través de su medición, no es posible conocer si las reservas de K_i son suficientemente grandes para sostener una adecuada concentración durante el período de crecimiento. Por tanto, una mayor precisión, puede lograrse midiendo el K_i y la capacidad amortiguadora de K que tiene un suelo en particular. La concentración de K_s o la saturación de K no proveen información suficiente para estimar los requerimientos de fertilización, puesto que el cambio en la concentración de K está de acuerdo con los contenidos de arcilla y de la CIC.

El término disponibilidad nutrimental, describe una situación muy compleja y no deberá ser confundida con el término cantidad disponible, lo cual comúnmente se hace en el caso de K y otros nutrimentos. Generalmente, el K_i se emplea como un índice de la disponibilidad nutrimental de K en el suelo, pero existen evidencias que cierta cantidad de K_{ni} puede ser disponible durante un ciclo de cultivo (Nair *et al.*, 1997; Kauffman y Bouldin, 1967), por lo que a final de cuentas todo el K que se encuentra en los tres reservorios en el suelo relacionados con la nutrición de los cultivos puede ser disponible, difiriendo sólo en su grado de disponibilidad. Para una planta en particular, además de la



cantidad de K presente en el suelo, la velocidad o tasa de suministro de K a la planta juega un papel importante. Debido a ello, no es sorprendente que en muchos casos exista la falta de correlación entre el método químico para determinar K_i utilizando NH_4OAc IN y la respuesta de la planta (Richards *et al.* 1988; Nair, 1996), dado que pueden medir la cantidad pero no la disponibilidad.

De hecho, ambos parámetros deberán ser considerados para conocer si la tasa con la cual un nutrimento es suministrado a las raíces es adecuada para mantener la tasa de crecimiento de la planta. Además es necesario evaluar si la cantidad de nutrimento presente en el suelo es suficiente para abastecer la demanda de la planta. Con el propósito de calcular la dosis correcta de fertilización de K deberá cuantificarse la cantidad actual (suministro) y conocer la capacidad amortiguadora de K, que a su vez depende de la cantidad y composición mineralógica de la arcilla presente. Teniendo en consideración que existen muchos factores que influyen en la disponibilidad de K y que la demanda nutrimental de una planta depende de la especie, de la biomasa producida y de las condiciones de crecimiento, es evidente que no existe un nivel único óptimo, sino que el nivel óptimo es función del cultivo, del rendimiento y de las condiciones edafoclimáticas; por tanto, la disponibilidad de K no es una propiedad constante en los suelos, sino que depende de la cantidad presente y de la energía con que el K es retenido por el suelo, lo cual es ampliamente variable. En este sentido, el nivel de K puede ser más adecuado en un período y considerablemente menor en otro. (Németh *et al.*, 1970).



En suelos con altas cantidades de Kni potencialmente disponible, la medición de Ki no da información precisa de la disponibilidad real de K en los suelos (Mengel *et al.*, 1998). Asimismo, en suelos desbasificados, la falta de respuesta de los cultivos a la fertilización en parte puede deberse a que los suelos fijan grandes cantidades de K (Richards *et al.*, 1988) y el grado de retención varía grandemente entre los suelos en función de los contenidos y tipo de arcilla predominante (During y Duganzich, 1979).

3.3.4 Potasio no intercambiable (Kni)

El Ks y Ki son las principales fuentes aportadoras de K para las plantas, pero el Kni puede contribuir significativamente a la cantidad de K que pueden acceder, aunque tiene que pasar primero a las posiciones de intercambio y después a la solución del suelo para poder ser absorbido por las raíces. Los suelos con potencial para liberar Kni, son aquellos con minerales de arcilla 2:1 del tipo de las micas e illitas, o ricos en minerales primarios como feldespatos de granulometría fina (Memon *et al.*, 1988). El Kni puede ser liberado a partir de los minerales del suelo como mica, vermiculita y clorita, cuando el Ks y Ki disminuyen debido a la absorción por las plantas. Esta liberación parece ser un proceso difusivo bajo condiciones neutras, sin embargo, la descomposición estructural puede ser importante en condiciones ácidas; por tanto, la composición mineralógica es más importante que el tamaño de partícula para la disolución de un mineral y en este sentido, las micas tri-octahédricas (plagiocita y biotita) son menos estables que las di-octaédricas (muscovita). Esto probablemente se relacione con la diferencia que existe en la energía de



retención de K, la cual es mayor para micas di-octaédricas que para tri-octaédricas. La tasa de liberación de cationes estructurales depende de la nueva superficie expuesta al ataque de H^+ (Feigenbaum *et al.*, 1981).

Contrariamente, las adiciones de fertilizantes potásicos a los suelos hacen disminuir la tasa de liberación de K_{ni} ; debido a que se incrementa la concentración de K_i , y se inhibe la difusión de K_{ni} (Badraqui *et al.*, 1992).

El K_{ni} es aquel que se encuentra entre los espacios interlaminares de las arcillas 2:1 y es retenido con mayor fuerza que el K_i . El K interlaminar no es fácilmente desplazado por otros cationes y mucho menos por cationes con radio iónicos mayores como son el Ca o Mg^{2+} , por tal razón este reservorio es denominado K no intercambiable (Mengel, 1980). Este K también es denominado K fijado, dado que puede difundirse hacia el interior entre las capas de los filosilicatos y quedar atrapado. La fijación significa que el K queda confinado en una forma no hidratado a diferencia del K_i el cual esta adsorbido en la superficie exterior plana y en los bordes de los minerales en una forma hidratada (Mengel *et al.*, 1998). Por su parte, Richards y Bates (1988), distinguen dos tipos de K_{ni} de acuerdo a su solubilidad en una secuencia de extracciones con HNO_3 1N; la fracción más soluble la denominaron Step K, y estuvo altamente correlacionada con la absorción de K por el cultivo de alfalfa y la fracción CRK, menos soluble no estuvo correlacionada. La fracción de arcilla comprendida entre 0.2 y 2.0 μm fue la que suministró el Step K al cultivo de alfalfa. Por tanto, concluyen que la medición de esta fracción, usado en



conjunción con el K intercambiable extraído con NH_4OAc podría mejorar substancialmente la predicción de la respuesta del cultivo a la aplicación de K.

La extracción de K con HNO_3 IN en ebullición ha sido empleado exitosamente por diversos investigadores como un índice del Kni (Knudsen *et al.*, 1989). La técnica de las resinas de intercambio catiónico también puede ser apropiada para evaluarlo, dado que simula de mejor manera la relación entre el K interlaminar y las raíces de las plantas (Mengel y Uhleubecker, 1993).

El Kni atrapado entre los espacios interlaminares de las arcillas es una fuente importante de K en muchos suelos para el crecimiento de las plantas y su disponibilidad depende en principio de la tasa de liberación a partir de los sitios interlaminares de las arcillas. Sparks (1987), señala que la cantidad de K interlaminar en suelos que contienen arcillas principalmente del tipo 2:1, en especial la vermiculita e illita, es alta comparada con la cantidad de K tomada por los cultivos, además, la disponibilidad de K interlaminar en arcillas no expandibles, no depende de su cantidad presente, sino que más bien esta relacionada con la tasa de liberación, la cual está determinada por el tipo de mineral potásico. En suelos ricos en micas v.g. Entisoles, el Ki puede llegar a ser menos importante desde el punto de vista de la cantidad nativa disponible de K para la nutrición de los cultivos, que el Kni de la fracción arcillosa (Mengel y Rahmatullah, 1994). La fracción limosa de suelos aluviales, debido a sus contenidos altos de micas, puede también liberar ciertas cantidades de K a partir del Kni (Mengel *et al.*, 1998).



Muchos métodos de análisis químicos que diagnostican la disponibilidad de K en los suelos no consideran el K no intercambiable, y esta es una razón del por qué en muchas situaciones existe muy frecuentemente una pobre relación entre el resultado del análisis químico y la respuesta del cultivo a la fertilización potásica (Mengel y Uhlenbecker, 1993). Sin embargo, una condición necesaria para que se origine la liberación del K de las posiciones de intercambio y pase a la solución del suelo, es que mediante la absorción de K por las raíces de las plantas la concentración de Ks se mantenga a un nivel muy bajo.

La liberación de Kni a la forma intercambiable es una característica importante de muchos suelos, pero es difícil predecir si la liberación de Kni puede contribuir significativamente en la nutrición de un cultivo durante su período de crecimiento. En este sentido, Kauffman y Bouldin (1967) determinaron que aproximadamente un 20 % del K adsorbido en la resina de intercambio catiónico se derivó del Kni; además que el crecimiento y desarrollo de raíces laterales de maíz durante 6-7 días fue suficiente para disminuir considerablemente el Ki del suelo cercano a las raíces. Meyer y Jungk (1993), determinaron que tanto la fracción de K en solución como K intercambiable fueron disponible para las plantas al mismo tiempo, independientemente del nivel de K intercambiable y de la concentración de K en solución. Una vez que el K de la solución del suelo disminuyó a 3-5 $\mu\text{mol L}$ debido a la absorción por las raíces de plantas jóvenes de maíz, ocurrió una considerable liberación de K no intercambiable, deduciéndose que tal concentración es el nivel crítico para que ocurra esta difusión. Asimismo, señalan que el 36 % de K absorbido por trigo y 21 % del K absorbido por remolacha azucarera se derivó de la fracción



de K no intercambiable. De la absorción total de K, el 64 y 79 % absorbido en trigo y remolacha azucarera, respectivamente, fue a partir del K_i . Al parecer estas diferencias fueron debidas a la densidad y longitud de raíces de las especies cultivadas; al haber una mayor densidad radical se propicia un incremento en la superficie radical absorbente, se reduce la distancia de difusión desde el sitio de liberación de K al sitio de absorción y se incrementa el gradiente de concentración de K.

La fijación de K ocurre a nivel de las posiciones no intercambiables y es muy variable en los suelos, dado que depende de la mineralogía, cantidad y tipo de arcilla; este aspecto toma relevancia en suelos donde predominan las arcillas 2:1 como el caso de las vermiculitas, illitas y micas, pudiendo ocurrir tanto en húmedo como en seco, mientras que en las esmectitas la retención solo se produce en seco por el colapso del mineral (Mengel, 1980). El potencial de fijación de K se incrementa a medida que el suelo es cultivado intensivamente sin la aplicación de fertilizante potásico, esto hace abatir considerablemente el K_{ni} , quedando dichas posiciones libres, que al momento de fertilizar, tienden a ser ocupadas con K^+ , originándose la fijación o retención. Hasta el momento, es difícil explicar como sucede la retención de K, porque además del tipo y cantidad de arcilla depende de diversos factores físicos y químicos, como es el caso del pH, CIC, presencia de otros cationes como Al^{3+} , Ca^{+2} , Mg^{2+} y Na^+ , contenido y variación de humedad en el suelo (Németh *et al.*, 1970).

Cuando el K presente en la solución del suelo es extraído por la absorción de los cultivos, ocurre la desorción de K desde el K_{ni} al K_i y K_s , para reponer la



disminución de la concentración de K. puesto que el sistema tiende a estar en equilibrio. En suelos con predominio de illita como mineral arcilloso puede ocurrir simultáneamente la fijación de K aplicado y la desorción de K a partir del K_{ni} (Scott y Bates, 1962); entonces la liberación neta de K^+ ocurre si la tasa de desorción es mayor que la tasa de fijación de K^+ (Mengel, 1980).

3.3.5 Capacidad amortiguadora de potasio (cK)

La capacidad amortiguadora o tampón de K (cK) de un suelo puede conceptualizarse como la resistencia que ofrece un suelo a los cambios en la concentración de K de la solución del suelo. Dicho de otra manera, es la capacidad que tiene un suelo para reponer el K_s a partir del K_i adsorbido en las arcillas. Por consiguiente, el cK es un índice de la labilidad del K_i y de la característica del equilibrio entre el K_s y K_i (Rodríguez, 1990).

El abastecimiento adecuado de K durante el ciclo de crecimiento de un cultivo es de vital importancia para lograr altos rendimientos y calidad del producto. Se ha demostrado que principalmente la concentración de K en la superficie radical y la capacidad amortiguadora de K (cK) controlan la absorción nutrimental de K por las plantas (Mengel, 1980). El nivel crítico de K_s se define como el nivel abajo del cual es posible obtener incrementos en el rendimiento cuando se aplica fertilizante. Dicho nivel está en asociación estrecha con la capacidad amortiguadora de K, la cual deberá considerarse para establecer los niveles críticos de K_s en los diferentes tipos de suelo (During y Duganzich 1979, Mengel y Busch, 1982).



La capacidad amortiguadora de K en el suelo se ha evaluado a través de la relación Q/I (cantidad/intensidad), en donde el K_i representa el factor cantidad y el K_s , el factor intensidad. Existen evidencias que la concentración de Ca^{+2} y Mg^{+2} presentes en el suelo influyen en la absorción de K por las plantas, lo que sugiere que las curvas Q/I podrían ser más apropiadas para estudiar la disponibilidad de K; sin embargo, después de varios años de mucha investigación a partir de las propuestas de Woodruff (1955) y Beckett, (1972) en varias partes del mundo, el concepto Q/I no siempre es exitoso para describir la disponibilidad de K en el suelo para las plantas (Rasnake y Thomas, 1976).

Además, los métodos para obtener la información necesaria en las curvas Q/I involucran mucho tiempo en mediciones analíticas de laboratorio. Un aspecto importante por lo que el concepto Q/I falla para predecir en forma precisa la disponibilidad de K en el suelo; es que no considera los efectos fisiológicos de la planta que parecen influir en esta relación; ni tampoco la presencia de otros cationes o aniones, así como los efectos cinéticos entre los reservorios de K (Evangelou et al., 1994). Sparks (1985), realizó una revisión detallada de aspectos involucrados en la cinética de reacciones en minerales de arcilla y suelos.

Nair et al (1997) señalan que una aproximación de la capacidad amortiguadora fue calculada relacionando K_{ni} con K_i ; sin embargo, a pesar de haberse comprobado que cierta fracción del K_{ni} puede ser liberada durante un ciclo de crecimiento del cultivo (Meyer y Jung, 1993), esta relación podría no ser muy



apropiada porque no considera el K_s , el cual constituye un reservorio muy importante, puesto que es a partir de aquí de donde las plantas accesan el K. Se sabe además que existe un equilibrio entre el K_s , K_i y K_{ni} , y cualquier entrada de K al suelo (vg. fertilizante potásico) y/o salida (absorción por la planta), ocasionará nuevos equilibrios entre los tres reservorios (Schneider, 1997).

En una situación de equilibrio, con una determinada concentración de K disponible, le deberá corresponder algún valor de K_i que esté en equilibrio con algún valor de la concentración de K_s del suelo y además, la habilidad para fijar K en algunos suelos podría ser mayor que su habilidad para liberarlo, entonces la capacidad amortiguadora de K no solo depende de las propiedades de intercambio sino también de las propiedades de liberación y fijación (Schneider, 1997).

Una forma más pragmática de evaluar el cK sin perder precisión en distintos suelos es mediante la asociación de K_i y K_s , siempre y cuando los suelos sean clasificados de acuerdo a su contenido de arcilla, lo cual presenta alta correlación con el cK (Németh *et al.*, 1970). En esencia, esto es debido a que el porcentaje y tipo de arcilla tienen una relación directa con la CIC. Al aplicar diferentes dosis de K en un suelo, se mantiene una relación constante entre el K_i y K_s que puede ser descrita mediante una función lineal simple, cuya pendiente varía dependiendo del tipo de suelo y representa la capacidad que tiene un suelo para mantener una determinada concentración de K_s , es decir a



la capacidad que tiene un suelo para resistir cualquier cambio en el contenido de K_s , denominándosele capacidad amortiguadora (cK) (Rodríguez, 1990).

A partir de los resultados de Németh *et al.* (1970) y Rodríguez (1990), se observa que las pendientes de las rectas de regresión lineal entre los cambios en K_s y K_i , al agregar diferentes dosis de K al suelo obedecen a su clase textural y la pendiente de cada una de las líneas correspondería al cK . En un suelo con una pendiente elevada (suelo arenoso), al suceder una ligera disminución en el contenido de K_i , se abatirá considerablemente la concentración de K_s , pero fácilmente será posible elevar los contenidos de K_s con un pequeño incremento del K_i ; esto significa que el suelo tiene un bajo cK (Rodríguez, 1990),

Contrariamente, un suelo arcilloso, presenta una menor pendiente, es decir un mayor cK puesto que ofrecerá resistencia a una disminución o incremento en la concentración de K_s al disminuir o aumentar respectivamente el K_i (Figura 2.2). Asimismo, puede observarse que para un mismo nivel de K_i , corresponde una concentración de K_s diferente para cada tipo de suelo. A partir de esta figura se deduce que si una planta absorbe la misma cantidad de K a partir de uno u otro suelo, la concentración de K_s del suelo arenoso disminuirá mucho más rápidamente que en el suelo franco, porque al tener mayor contenido de arcilla podrá reponer más fácilmente el K_s a partir del K_i .

Relaciones entre K_i y K_s para diferentes tipos de suelo. Adaptado a partir de Németh *et al.* (1970). La línea que representa esta relación se deriva de una



regresión lineal simple pero la pendiente de esta línea es diferente para cada grupo textural, en donde puede apreciarse que a medida que los contenidos de arcilla y limo son menores la pendiente es mayor y viceversa. Esta relación resulta así principalmente debido al grado de saturación de K de los coloides del suelo. También existe una alta correlación entre el porcentaje de saturación de K (PSK) de la CIC y la concentración de Ks. En suelos francos, un mayor porcentaje del K intercambiable está adsorbido en las posiciones de los bordes e interláctice en comparación con los suelos arenosos. La intensidad de abastecimiento de K (concentración de Ks) a las raíces de las plantas está considerablemente influenciada por el contenido de arcilla y limo, por lo que el suministro de K no puede ser estimado correctamente sin considerar la textura del suelo o el PSK.

En las arcillas 2:1 el K puede ser adsorbido en tres posiciones diferentes: interláctice, bordes y la superficie plana; estas posiciones difieren mucho en su selectividad para K. En suelos con bajos contenidos de arcilla y limo el K esta predominantemente adsorbido en la superficie plana de los minerales, a diferencia de los suelos francos y limosos, en los cuales existe una mayor proporción de K intercambiable adsorbido en los bordes y probablemente en la zona interláctice (Németh *et al.*, 1970). Cuando la saturación de K es baja, menor será también la concentración de Ks y casi todo el Ki se localiza en las posiciones de los bordes e interláctice; por lo tanto, puede señalarse que en suelos ricos en arcillas y limo, es de esperarse que cuando se adiciona K al suelo, se incrementa el K ubicado en la superficie plana de la arcilla y por



consiguiente también se incremente la concentración de K en la solución del suelo (Schouwenburg y Schuffelen, 1963).

En este sentido, al agregar diferentes cantidades de K como fertilizante en suelos con similares contenidos de K_i , la concentración de K_s variará de acuerdo con la capacidad amortiguadora de los suelos, estando determinada por la especificidad de los sitios de intercambio dado por el tipo de arcilla y la cantidad de sitios de acuerdo con la CIC (Németh, 1975; Wada y Odahara, 1993).

En un sentido más amplio, los suelos Vertisoles y Molisoles presentan los cK más bajos; los Inceptisoles y Alfisoles tienen valores intermedios; y los Entisoles, Ultisoles y Andisoles tienen valores de cK más altos. Por tanto, lo que implica el valor del cK en la determinación de la dosis de fertilización potásica en suelos deficientes de este nutrimento, es que mientras más bajo sea el valor del cK , se requerirán mayores aplicaciones de K para obtener un nivel adecuado en el suelo, pero también será más difícil su abatimiento, debido a la fuerza de adsorción con que son retenidos en las arcillas.

De lo contrario cuando el cK es muy alto, con una dosis menor de K que en el caso anterior se podrá abastecer adecuadamente al cultivo, pero también los niveles edáficos de K pueden disminuir rápidamente debido la absorción por los cultivos (Rodríguez y Galvis, 1989). El valor del cK dependerá de la composición mineralógica y del contenido de arcilla. Suelos con arcillas 2:1 presentan cargas específicas para K donde queda retenido en forma



intercambiable. Según la carga y sus características mineralógicas será mayor o menor el número de los sitios específicos.

Por su parte, las arcillas 1:1 solo tienen cargas en el exterior de sus superficies y carecen de sitios específicos por lo que el K_i fácilmente puede equilibrarse con el K_s . En un sentido práctico, el cK permite establecer la dificultad o facilidad para elevar los valores de K en el suelo a través de fertilización.

La determinación del cK en los suelos, tiene un sentido agronómico muy práctico puesto que nos da mayor seguridad en los cambios que ocurren en los diferentes reservorios de K cuando se adiciona este nutrimento en forma de fertilizante al suelo, puesto que de acuerdo a la capacidad amortiguadora que tengan los suelos serán los cambios producidos, en cuya respuesta impacta mucho la cantidad y tipo de arcilla presente en el suelo. En un suelo arcilloso los cambios producidos en la concentración de K_s , debido a la adición de fertilizantes potásicos, serán menor que en un suelo arenoso, aun cuando inicialmente presenten el mismo contenido de K intercambiable. En virtud de lo anterior, el cK permite lograr mayor precisión para calcular el suministro edáfico de K .

3.3.6 Importancia de las Raíces en el proceso de absorción de Potasio

La difusión es el principal mecanismo por el cual las raíces de las plantas acceden iones K^+ a partir de la solución del suelo, por lo que el movimiento de los iones ocurre a partir de una zona de alta concentración a otra de baja



concentración. El movimiento ocurre hacia la zona de baja concentración tendiendo a un equilibrio, el cual es difícil lograr debido a la absorción nutrimental por las raíces, originándose un movimiento continuo a través de un gradiente de concentración.

Algunos factores que afectan este mecanismo de acceso son: humedad edáfica, tortuosidad de los poros del suelo, concentración nutrimental, especie vegetal y etapa de crecimiento (Barber, 1984). El acceso de K^+ por flujo de masas puede representar solo del 10-17% del total de potasio absorbido (Barbar, 1984).

En la absorción de K por las plantas pueden operar dos mecanismos dependiendo de la concentración presente en el exterior de las raíces. El mecanismo I sucede cuando la concentración de K es aproximadamente 0.5 mmol L^{-1} en la solución del suelo. En estas concentraciones la absorción de K es un proceso más selectivo. En cambio, el mecanismo II, opera en concentraciones mayores de 50 mmol L^{-1} , y es menos selectivo (Mengel, 1984). Sea uno u otro mecanismo, las especies vegetales difieren en su habilidad para absorber K, la cual está relacionada con la densidad radical. El maíz, trigo y remolacha tienen la capacidad de absorber K aun cuando la concentración de este elemento en la solución del suelo disminuye (Mengel y Kirkby, 1980).

Los procesos o factores que contribuyen a la transferencia de los nutrientes del suelo a las plantas son variados, e involucran a la raíz, la concentración de los



iones de la rizósfera, el ambiente y la actividad de los microorganismos del suelo cuadro (Alcántar, 2007).

Cuadro 2. Proceso y factores involucrados en el movimiento de los nutrientes del suelo a la planta (Junk, 1991).

Proceso	Factor involucrado
Desarrollo de la raíz	Longitud y distribución, morfología
Absorción de nutrientes	Concentración en la rizosfera Cinética de absorción
Flujo de masas, difusión	Transpiración Gradiente de concentración
Movilización por las raíces	Exudados radicales pH de la solución del suelo Enzimas
Movilización por organismos simbióticos	Micorrizas Bacterias

Debido al continuo desarrollo del sistema radical para explorar y explotar nuevas zonas del suelo, las raíces son capaces de crecer, en proporciones mucho mayores a las distancias que pueden difundir los iones a través del suelo. Es probable que las raíces jóvenes estén, generalmente rodeadas de mayores concentraciones de nutrimentos que las raíces maduras, lo que favorece la absorción nutrimental (Alcántar, 2007).



Las propiedades físicas y químicas del suelo, o del medio de crecimiento en los sistemas de cultivo sin suelo, afectan la elongación, orientación y el patrón de ramificación de la raíz (Feldman, 1984). Cualquier estrés, en la zona radical se expresa en la parte aérea, afecta la partición de materia seca entre raíces y vástagos. Por lo tanto, afecta la productividad de la planta (Brouwer y De Wit, 1969). El equilibrio funcional entre raíces y vástagos corresponde a un crecimiento interrelacionado, en el cual los cambios en la tasa del crecimiento aéreo se expresan en la raíz y viceversa (Brouwer, 1963).

Por otra parte, un sistema radical corto y poco proliferado explora un menor volumen de suelo para la obtención de agua y nutrientes. Una menor longitud de raíces por unidad de volumen de suelo y/o una menor densidad radical requiere que las tasas de absorción de agua y nutrientes se mantengan más elevadas de lo normal para poder satisfacer las demandas de los cultivos en crecimiento (Bennie, 1991).

Estudios realizados con materiales de origen orgánico, por ejemplo resaca de monte (restos de vegetación herbácea, arbustiva y arbórea), cama de pollo y/o gallina (mezcla de estiércol de pollo y/o gallina con los materiales que se usan como cama en los gallineros) y humus de lombriz, en mezcla con y sin suelo, mostraron resultados satisfactorios como sustratos de crecimiento para hortalizas (Princich *et al.*, 1997; Valenzuela y Gallardo, 1997; Subler *et al.*, 1998; Atiyeh *et al.*, 2000; Rothman *et al.*, 2000). Sin embargo, sustratos nutricionalmente muy enriquecidos pueden ser perjudiciales debido a su alto contenido de sales solubles (O'Hallorans *et al.*, 1993; Chang *et al.*, 1994; Chang



y Rinker, 1994; Gómez *et al.*, 1996). En gran medida, el uso de materiales compostados permite reemplazar la utilización de recursos no renovables (ej. turba), y transformar en sustrato aprovechable desechos orgánicos que eventualmente contaminan el medio ambiente. De este modo se favorece el crecimiento de los cultivos a través de una porte de micro y macronutrientes que de otra forma deberían ser incorporados mediante fertilización (Prieto, 2005).

La incorporación de nutrientes en forma mineral en las mezclas de sustratos puede mejorar su disponibilidad inmediata, contrarrestando el efecto de inmovilización transitoria ocasionada por los componentes orgánicos del sustrato (C: N, C:P). Más aun, puede disminuir o evitar la necesidad de agregar composta o suelo.

Cada especie vegetal tiene un sistema radicular característico que está determinado por la constitución genética de la planta. Así, la morfología y el esquema de distribución de las raíces son características propias de cada especie vegetal. Sin embargo, el desarrollo de las raíces está supeditado hasta tal punto a las condiciones del medio en que se realiza, que dicho sistema puede llegar a adoptar una distribución totalmente diferente a la normal de una especie determinada (Domínguez, 1997).

Las raíces desempeñan, como funciones principales para la planta, las siguientes: absorción del agua y de los elementos nutritivos, transporte de estos elementos a las partes aéreas, producción de fitohormonas, acumulación



de materiales de reserva y sostén o soporte de la planta. Por otra parte, las condiciones necesarias en el suelo como medio de crecimiento para un desarrollo adecuado del sistema radicular, son fundamentalmente las siguientes: facilidad de penetración a las raíces, profundidad, humedad, aireación, temperatura y fertilidad (Domínguez, 1997). La eficiencia del sistema radical en la absorción de agua y minerales depende de su longitud, extensión, densidad, ramificación, permeabilidad, conductancia hidráulica, y de la profundidad de penetración (Kramer, 1983; Kramer y Boyer 1995).

En condiciones adecuadas, el crecimiento de las raíces es también característico de las especies. Así, se han registrado crecimientos en frutales del orden de 3 a 9 mm por día, mientras que, en las gramíneas 10 mm/día, puede considerarse normal y en cultivos de desarrollo rápido, como el maíz, se puede observar crecimientos de 60 mm/día (Domínguez, 1997).

La longitud que pueden alcanzar las raíces es muy considerable, aunque depende de que la planta este aislada o en cultivo, en cuyo caso sufre la competencia de sus congéneres por la explotación del suelo. En el primer caso, se han observado plantas aisladas cuyas raíces sumaban una longitud de hasta 60 km. La actividad funcional de la raíz en cuanto se refiere a absorción de agua y elementos nutritivos, queda centrada sobre todo en una parte pequeña del sistema radicular. A medida que crece la raíz, se va formando en las células radicales y más concretamente en la endodermis, una capa suberizada constituida por compuestos lipoides y lignina que representa una barrera importante al paso del agua y elementos minerales disueltos. La



actividad del sistema se localiza, por lo tanto, en el extremo de las raíces, en la zona comprendida entre el ápice o punto vegetativo en desarrollo y la parte en que se inicia la suberización y en la cual la capa suberizada es aún de poco espesor. Esta zona es de color blanco y se va volviendo marrón a medida que se suberiza. La capacidad de absorción disminuye drásticamente a medida que se incrementa la suberización (Domínguez, 1997).

Así pues, del volumen total explorado por las raíces y de la superficie que ocupan, en su conjunto, solo una mínima parte puede considerarse efectiva, si bien existe evidencia de que la absorción de agua y nutrientes se realiza en toda la superficie radicular (Newman, 1974; Russell, 1981).

La distribución del sistema radicular puede adoptar dos tendencias diferentes principales, según que el sentido de crecimiento preferente, sobre todo al principio del desarrollo, sea horizontal o vertical. En el primer caso, se obtiene un sistema radicular de tipo extensivo fasciculado de gran proliferación y desarrollo superficial (caso de las gramíneas, papa, etc.). En el segundo caso, se crea un sistema radicular pivotante en profundidad y con variable desarrollo horizontal (remolacha, algodón, alfalfa, judías, etc.), (Domínguez, 1997).

Estas tendencias generales que son características de cada especie se ven afectadas, como hemos dicho, por las condiciones del suelo. En primer lugar, el desarrollo de las raíces exige que no existan limitaciones mecánicas que lo impidan. En caso de dificultad, las raíces se abren paso a través de canales, grietas y cualquier espacio en el que se pueda desarrollar sin resistencia en



segundo lugar la distribución y las características de humedad del suelo son determinantes del desarrollo en profundidad de las raíces. Los demás factores apuntados, como la aireación, temperatura y la fertilidad del suelo, influyen igualmente en el tamaño y distribución de las raíces. Así, en un suelo fértil y con buenas condiciones físicas, puede desarrollarse un sistema muy ramificado y compacto, cuya superficie activa puede estar concentrada en una zona relativamente pequeña. Por el contrario en suelos pobres en fertilidad y condiciones físicas, la misma superficie activa para obtener resultados similares debe ocupar un volumen de suelo mucho más extenso (Domínguez, 1997).

La estructura del suelo tiene una gran influencia directa o indirectamente en el desarrollo vegetal a través de su incidencia en el crecimiento de la raíz. Hay que tener en cuenta que la estructura del suelo determina las condiciones de otros factores de primera magnitud para el desarrollo de la raíz, como son la humedad y la aireación, por lo que es difícil separar los efectos de cada uno de estos factores en particular. Por lo tanto, hay que considerar los efectos de la estructura como la integración o resultante de los efectos de todos los factores que dependan de la misma (Domínguez, 1997).

La estructura del suelo tiene un efecto directo en el desarrollo de la raíz, que corresponde a la resistencia física que opone a la penetración de la raíz. Una estructura porosa, esponjosa, mullida, con agregados estables, tiene una influencia muy favorable, como es el caso de la estructura granular, en la que se equilibren la macroporosidad y la microporosidad, con lo que se asegura



una buena aireación y retención de humedad, y además se ofrece la mínima resistencia física al crecimiento de la raíz. En estas condiciones y salvo que limiten el aire y la humedad, el sistema radicular se ramifica y extiende fácilmente. Por el contrario, cuando las raíces encuentran, por ejemplo, capas sucesivas de arena y arcilla, atraviesan la primera y se multiplican en la segunda, aunque si ésta es sucesivamente plástica y resistente a su penetración tenga que aprovechar las grietas e intersticios entre ellas. En general, las raíces responden a la atracción por el agua y los elementos nutritivos, y por ello se puede llegar a deformar la distribución física tradicional, cuando se encuentran capas duras compactadas, rocas, etc. Un ejemplo clásico de la influencia directa de la estructura, en el desarrollo vegetal, es el fallo frecuente de la nascencia en los suelos en los que se ha formado una costra consistente (Domínguez, 1997).

Se ha comprobado, por ejemplo como el incremento de la proporción de agregados superiores a medio milímetro aumentaba considerablemente el rendimiento en el cultivo de cebollas (Domínguez, 1997).

- **Resistencia mecánica del suelo al desarrollo radicular**

El crecimiento de la raíces en el suelo debe vencer la presión correspondiente al desplazamiento de las partículas que deben dejar espacio suficiente a los nuevos tejidos en desarrollo. Es particularmente destacable la especial sensibilidad de las raíces a esta resistencia mecánica, habiéndose comprobado que el crecimiento de las mismas se reduce al 50% cuando tiene que vencer



presiones tan pequeñas como 0.2 kg/cm^2 . No obstante, el crecimiento no se detiene totalmente hasta que la resistencia mecánica del suelo es superior, a la presión osmótica de las células en desarrollo, que puede ser mayor de 5 kg/cm^2 . Esta sensibilidad parece radicar en el tejido meristemático (Domínguez, 1997). Según Aruani, M. C., y Behmer, S., 2004, la resistencia a la penetración tiene mayor incidencia en la distribución radical en suelos de granulometrías medias que en suelos de granulometrías gruesas.

Para que no exista limitación al desarrollo de la raíz el suelo debe presentar planos o zonas continuas de baja resistencia en las que las raíces puedan penetrar libremente o sean fácilmente expandibles. Esto ocurre en los suelos ligeros mientras que en los suelos pesados y compactos las raíces deben aprovechar las fisuras y poros o los canales creados por lombrices, raíces viejas, etcétera. La continuidad de estos canales que a su vez son la vía de infiltración del agua y de difusión del oxígeno puede verse interrumpida en algunos casos por las labores (Domínguez, 1997).

Actualmente, con el desarrollo de los herbicidas es necesario reconsiderar la conveniencia del laboreo intensivo del suelo. La tradicional teoría de lograr una completa mezcla y pulverización del suelo para aumentar la superficie disponible para las raíces puede ser contraproducente en algunos casos. En efecto, una excesiva disgregación puede bloquear e interrumpir las vías de penetración del agua, el aire y de las raíces, dificultando su desarrollo en profundidad, lo cual, a su vez, es básico en condiciones de escasa humedad (Domínguez, 1997).



La experiencia actual sobre la reducción del laboreo, independientemente del ahorro energético que supone, está teniendo resultados prometedores en la productividad de los cultivos. Un sistema racional de laboreo mínimo contemplando las necesidades específicas de cada cultivo y en consecuencia la frecuencia, profundidad e intensidad de las labores ha obtenido resultados muy superiores, tanto al laboreo tradicional como con respecto al no laboreo al conseguir un mullimiento suficiente del suelo para determinados cultivos como las raíces y los tubérculos, evitando su excesiva pulverización al reducir al mínimo el laboreo en otros cultivos como los cereales (Domínguez, 1997).

- **El sistema radicular como integrador de las relaciones suelo-planta**

Existe un equilibrio característico entre el desarrollo de la raíz y el de la parte aérea de las plantas, de tal modo que su alteración por una u otra causa tiende a corregirse en un periodo más o menos largo. El sistema radicular, mediante la producción de hormonas de crecimiento tiene una influencia considerable en la regulación del crecimiento en general de toda la planta y, por tanto, en la consecución de todo su potencial productivo. En efecto, recientemente se ha puesto de manifiesto este aspecto funcional de la raíz. El ápice de la raíz produce cantidades importantes de citoquininas y giberelinas principalmente, así como ácido abscísico (ABA) y etileno en conjunto con otros tejidos radiculares (Michael y Beringer, 1980).



Así pues, todos los factores limitantes del desarrollo de la raíz en el suelo, (agua, aire, resistencia mecánica, etc.) pueden tener un efecto depresivo sobre la producción. De hecho en zonas en las que se ha mantenido una climatología muy uniforme se han podido observar diferencias de producción en un cultivo de hasta un tercio de la cosecha máxima. Este efecto puede ser causado por diferentes combinaciones de los factores citados (Domínguez, 1997).

Sin embargo, dentro de ciertos límites el sistema radicular de las planta tiene una gran capacidad compensatoria respecto a determinadas limitaciones del medio, bien mediante la proliferación de raíces en las zonas más favorables del suelo para el desarrollo (humedad, elementos nutritivos, etc.) como por medio de la creación de defensas morfológicas (parénquimas esponjosos para facilitar la difusión del oxígeno. pelos radiculares especiales, etc.). Mediante esta capacidad de adaptación a condiciones desfavorables del medio el sistema radicular puede reducir los efectos perjudiciales de dichas condiciones sobre el desarrollo y la producción.

Esto es de gran importancia especialmente en lo que se refiere a la humedad, principal factor limitante en las regiones áridas o semiáridas. En este caso, el sistema radicular tiene un papel destacado dentro de los diversos mecanismos de defensa y adaptación que tienen las plantas: modificaciones morfológicas y fisiológicas (resistencia al flujo de agua, reducción de la luz recibida por variación de la posición de las hojas, almacenamiento de agua en los tejidos), ajustes de la presión osmótica y, sobre todo, desarrollo radicular (Domínguez, 1997).



Por último, hay que considerar que también los sistemas radiculares de las plantas son capaces de modificar las condiciones físicas del suelo. Sobradamente conocidos son los efectos favorables de los cultivos de leguminosas durante varios años y el enterrado en verde de estas mismas especies. Por otra parte, las raíces pueden crear en la rizosfera condiciones localizadas muy diferentes a las generales en el suelo.

Así, pueden producirse cambios de pH de hasta 2 unidades, mayor cantidad de oxígeno, o mediante la excreción de sustancias orgánicas aumentar la capacidad de quelación de elementos, reducción de los mismos, etc. Las raíces segregan al suelo gran cantidad de sustancias orgánicas tanto en las zonas apicales como por toda la superficie radicular (Russell, 1980), que estimulan el desarrollo de los microorganismos y aumentan la estabilidad estructural del suelo.

Así es bien conocida la influencia favorable sobre dicha estabilidad de los polisacáridos. Por último hay que ser conscientes de que en las interrelaciones suelo-planta se combinan factores que corresponden a campos diferentes de la ciencia y que solo mediante el conocimiento en que dichos factores en su conjunto afectan al desarrollo de la raíz es posible corregir o reducir sus efectos desfavorables. Ello exige una estrecha coordinación entre la fisiología vegetal, la física y química del suelo y la microbiología principalmente. Solo de este modo, es decir, conjuntamente, se llegarán a comprender estas complejas interacciones (Domínguez, 1997).



3.4 Resumen de la Revisión de Literatura

El potasio es considerado como un macronutriente esencial en el crecimiento y desarrollo de la planta, que cuando este, es deficiente se retarda el crecimiento y es traslocado a las hojas jóvenes de las plantas. El potasio está involucrado en diferentes procesos de la planta como es la activación enzimática, síntesis de proteínas, síntesis de almidón, conversión de energía metabólica, fotosíntesis, proceso de osmoregulación, traslocación de asimilados, entre otros como protección a enfermedades.

Desde el punto de vista de la nutrición de los cultivos, existen tres reservorios relacionados con la dinámica del potasio en el suelo que son el potasio en la solución del suelo (K_s), el potasio intercambiable (K_i) y el potasio no intercambiable (K_{ni}). Es fundamental entonces conocer el tamaño de cada uno de los reservorios y la velocidad con la que se dan los flujos entre ellos en los distintos suelos o sustratos agrícolas y poder relacionarlo con la cantidad disponible de K para la producción de cultivos.

La capacidad amortiguadora (cK) que tiene un suelo de reponer el K_s a partir de K_i adsorbido por las arcillas es un índice de labilidad del K_i y de la característica de equilibrio entre K_s y K_i , de allí que esto sea un aspecto importante que debemos considerar para determinar el suministro edáfico de K con mayor éxito. Por tanto debemos reconocer que la concentración de K_i es solo un índice de la disponibilidad de K para los cultivos y para obtener el valor real del suministro de K por el suelo debemos considerar además del K_i y cK , la



eficiencia de absorción por las plantas, la cual es función de la densidad radical (van Noordwijk y de Willigen, 1986). Finalmente, debemos considerar que la tecnología de aplicación de fertilizantes también influye sobre la eficiencia de absorción de K por las plantas, puesto que habrá diferencias si el fertilizante potásico es adicionado en forma de gránulos sólidos o mediante sistemas de fertirrigación con riego por goteo y micro aspersión.

La relación suelo-planta constituye un sistema muy dinámico en el que intervienen un sinnúmero de procesos químicos, físicos y biológicos que están involucrados en el suministro nutrimental a las raíces de las plantas.

Con base a lo anterior , si partimos del hecho que en los sistemas de producción agrícola existen entradas y salidas relacionadas con la dinámica del potasio, es necesario cuantificarlas para desarrollar una estrategia de manejo agronómico tendiente a optimizar la relación suelo-planta-fertilizante y desde el punto de vista de la nutrición de cultivos permitirá establecer dosis adecuadas de fertilización.



IV.- MATERIALES Y METODOS

Se desarrolló el experimento en uno de los invernaderos automatizados del laboratorio de Ingeniería de Riego, campo experimental Tlapeaxco del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo.

En este experimento se evaluó la influencia de 5 concentraciones de Potasio ($Q_k = 0, 50, 200, 350$ y 500 kg/Ha), de las cuales fueron aplicadas mediante una fertilización de fondo a cuatro tipos de sustratos (Tezontle, Agrolita, Peat Moos y una mezcla de estos en proporciones iguales) con diferente grado de reactividad de menor mayor, respectivamente, incorporando en estos tres tipos de cultivos con deferente densidad radical (Avena, Cebolla y Frijol).

Siembra de los cultivos

El experimento se inició con la siembra de las semillas de los cultivos en cuestión, en charolas de 200 plántulas, con sustrato de Peat Moos para plántula, iniciando previamente con la cebolla el día 11 de diciembre de 2009, después se sembraron las semillas de avena y frijol el día 15 de febrero de 2010, mismas que fueron cuidadas en el laboratorio de ingeniería de riego del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, dándoles un riego pesado diario hasta la germinación y obtención de plántula.



Trasplante y Fertilización de los cultivos

Después de la obtención de la plántula de los cultivos, se prosiguió con el trasplante, la cebolla se trasplantó 30 días después mientras que la avena y frijol fueron 20 días después de su siembra, este trasplante se realizó en bolsas de polietileno negro de 40 X 40 cm con los sustratos ya mencionados quedando de la siguiente manera el arreglo de tratamientos: 5 niveles de Potasio (0, 50, 200, 350 y 500 kg/Ha), tres cultivos (Avena, Cebolla y Frijol) y 4 sustratos (Agrolita, Tezontle, Peat-Moss y Mezcla), por lo que se llegó a un experimento de 60 tratamientos, con tres repeticiones cada uno.

Cuadro 3. Dosis para cada tipo de Sustrato en el cultivo de la Avena

AVENA			
Agrolita	Tezontle	Peat-Moss	Mezcla
1 Kg/Ha de K	2 Kg/Ha de K	1 Kg/Ha de K	2 Kg/Ha de K
50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K
200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K
350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K
500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K

Cuadro 4. Dosis para cada tipo de Sustrato en el cultivo del Frijol

FRIJOL			
Agrolita	Tezontle	Peat-Moss	Mezcla
1 Kg/Ha de K	2 Kg/Ha de K	1 Kg/Ha de K	2 Kg/Ha de K
50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K
200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K
350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K
500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K



Cuadro 5. Dosis para cada tipo de Sustrato en el cultivo de la Cebolla

CEBOLLA			
Agrolita	Tezontle	Peat-Moss	Mezcla
1 Kg/Ha de K	2 Kg/Ha de K	1 Kg/Ha de K	2 Kg/Ha de K
50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K	50 Kg/Ha de K
200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K	200 Kg/Ha de K
350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K	350 Kg/Ha de K
500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K	500 Kg/Ha de K

Se hizo una fertilización de fondo para cada tratamiento, la cual se realizó manualmente, aplicando como fertilizante Potásico al Nitrato de Potasio (KNO_3).

Para la aplicación de los demás macronutrientes se utilizaron fertilizantes comerciales, homogeneizando todas las concentraciones para los diferentes tratamientos, se utilizó Ácido Nítrico para satisfacer al Nitrógeno llegando a una aplicación de 200Kg/Ha y DAP, para Fósforo, hasta llegar a 92 Kg/Ha, aplicados de manera manual a los sustratos a 5cm de profundidad para el caso de DAP y para el caso del ácido Nítrico diluido con el agua de riego.

De la misma manera para el suministro de los micronutrientes fueron usados los siguientes fertilizantes Bórax, Sulfato de hierro, Sulfato de Magnesio, Sulfato de Cobre, Sulfato de Zinc diluidos en agua de riego, los cuales se aplicaron una vez durante todo el experimento, se utilizó la misma dosis recomendada para jitomate en este invernadero. Se continuó con la aplicación de agua de riego durante todo el ciclo de cultivo el cual para el caso del experimento concluyó antes de la floración (Antesis), la cual fue aplicada



mediante riego por goteo, con Timers los cuales aplicaban riegos intermitentes de 3 minutos dos veces al día para evitar la lixiviación de los fertilizantes aplicados.

Muestreo y colecta de datos del experimento en Peso Fresco

Durante el experimento se realizaron 3 muestreos destructivos, en diferentes etapas fenológicas de la planta aproximadamente cada 25 días a partir del primer mes después del trasplante. Cada muestreo consistió en cosechar la planta completa separando raíz de parte aérea, posteriormente se lavaron con agua destilada y se prosiguió con la medición del volumen de raíz mediante diferencia de volumen con una probeta graduada. A la parte aérea se midieron los pesos frescos para después hacer una comparación con los pesos secos. Ya obtenidos los pesos y volúmenes se hizo la destrucción del material vegetal, tanto raíz como parte aérea, para ponerlas en bolsas de papel y así llevarlas a la estufa de secado, a 45 grados durante 72 horas, para obtener el peso seco de cada planta.

Colecta de datos en peso seco y molienda de las muestras

Después de haber obtenido las muestras en peso seco, de los diferentes muestreos, se prosiguió a la pesada y molienda de estas incluidas la raíces, con un molino para muestras pequeñas, utilizando una maya numero 60, para después mandar a laboratorio donde a través del método de digestión húmeda



y flamometría se determinó la concentración de potasio en cada una de las muestras.

Análisis estadístico de la información

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos en el experimento, estos fueron organizados de modo que pudieron considerarse los aspectos de evaluación siguientes:

- 1) Efectos de la dosis de fertilización en el peso del follaje fresco y volumen radical de la planta.
- 2) Efectos de la dosis de fertilización en el peso seco de la parte aérea de la planta.
- 3) Efectos de la dosis de fertilización en el volumen radical de la planta con respecto al tipo de sustrato utilizado.
- 4) Concentración del nutriente en función de la dosis de fertilización aplicada.

En los cuales se realizaron regresiones lineales con los datos, para la obtención de modelos de comparación entre ellos, que permitieron la interpretación de los resultados.



V.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Peso fresco (parte aérea)

La biomasa total aérea de los cultivos, se incrementó con la adición del fertilizante potásico, en el tratamiento 2(50Kg/Ha) y 3 (200Kg/Ha), en los tres cultivos analizados, como se muestra en las figuras 1, 2 y 3, observándose una tendencia lineal positiva, la cual demuestra que a mayor cantidad de fertilizante potásico aplicado a los sustratos de manera manual existe una mayor producción de la materia fresca del frijol, avena y cebolla, debido a una estrecha relación que tiene el potasio con la absorción de nitratos (NO_3^-). El potasio (K^+) junto con el Nitrógeno (N), es uno de los elementos que mayor influencia tiene sobre el crecimiento y metabolismo de la planta puesto que actúa activando enzimas (Evans y Sorger, 1982), regula la apertura y cierre de estomas (Humble y Rashcke, 1971), y equilibra la carga de los aniones (Streeter y Barta, 1984).

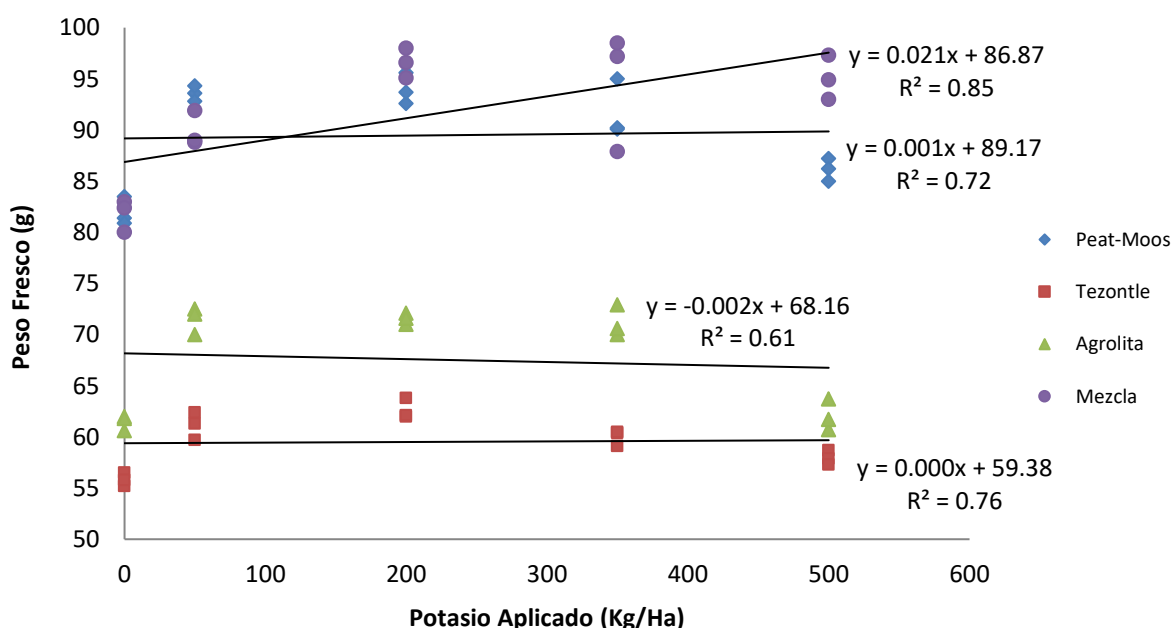


Figura 5. Peso fresco del cultivo de cebolla en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

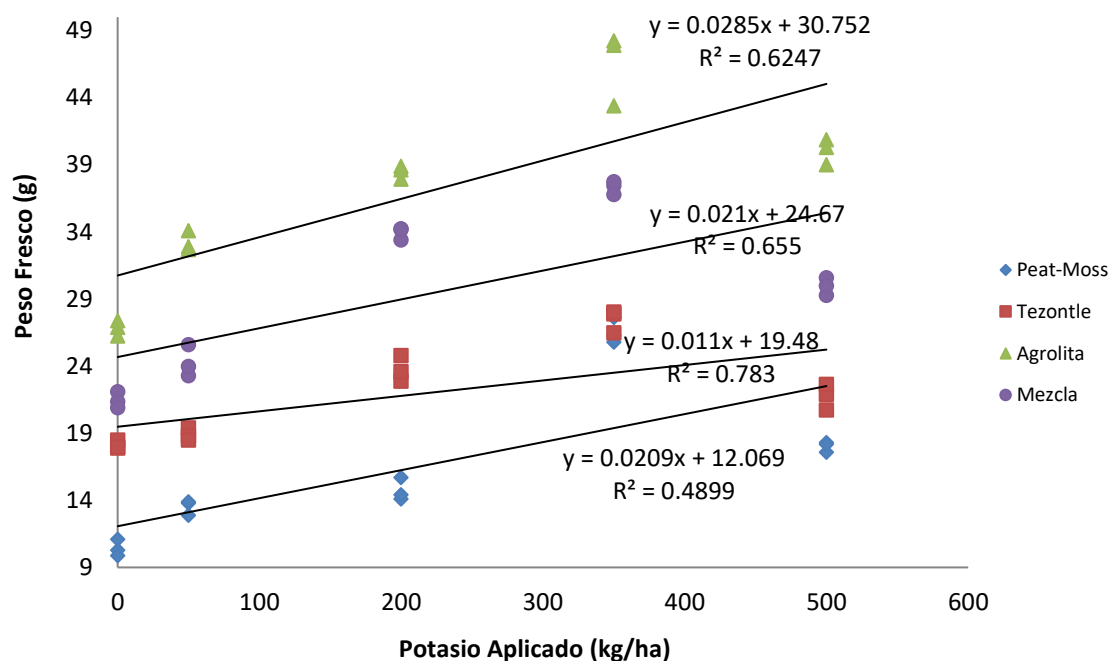


Figura 6. Peso fresco del cultivo de avena en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

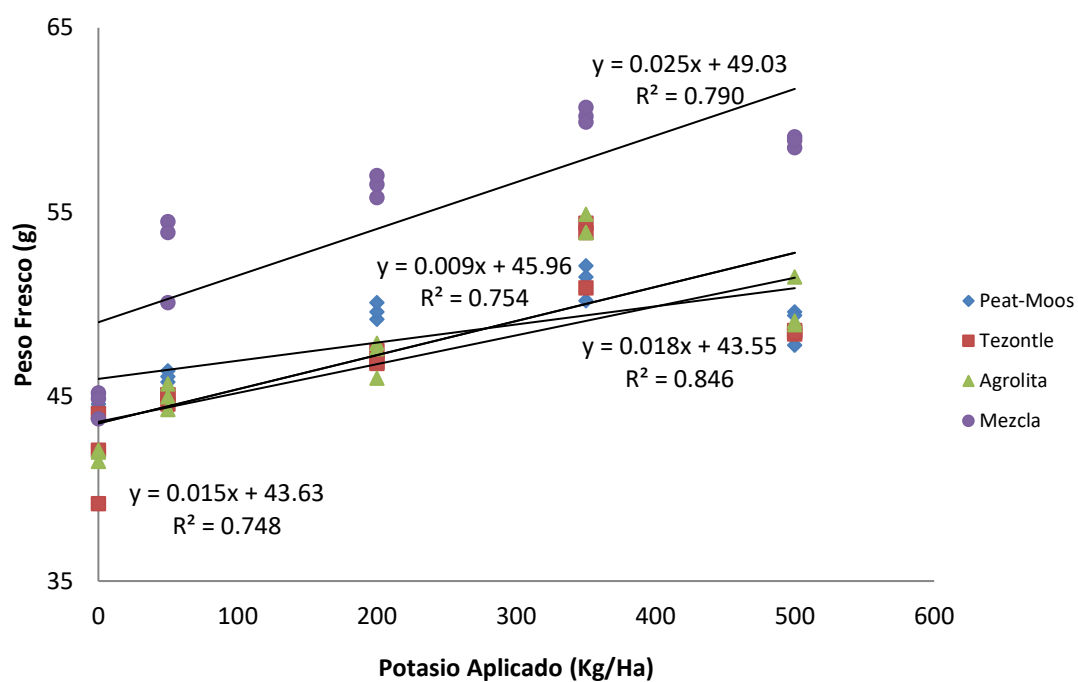


Figura 7. Peso fresco del cultivo de frijol en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

Un adecuado aporte de potasio es necesario para el uso eficiente de la fertilización nitrogenada ya que se ha comprobado que la limitación de K⁺



afecta la asimilación de NO_3^- , (Ruiz y Romero, 2002). Diferentes trabajos han demostrado la implicación del potasio en la absorción de, traslocación y asimilación de nitratos en las plantas, tal es el caso de Rufty *et al.* (1981) los cuales demostraron la estrecha relación entre K^+/NO_3^- a nivel de absorción y transporte. Por otro lado, se ha demostrado que la ausencia de K^+ afecta también la asimilación de NO_3^- , ya que los NO_3^- , son absorbidos y en gran parte asimilados por las raíces (Siebrecht y Tischner, 1999). También cabe destacar que en los tratamientos 3(200Kg/Ha), 4(350Kg/Ha) y 5(500Kg/Ha) de nuestro experimento, la tendencia siguió hacia una constante. Sánchez.*et al.*, 2006 afirman que las dosis de K^+ por encima del óptimo, causan menor crecimiento en la parte aérea en el cultivo del frijol. Sin embargo, y pese al efecto directo existente del K^+ sobre la absorción, traslocación y asimilación de NO_3^- , hay poca información disponible sobre la relación entre estos nutrientes inorgánicos cuando el K^+ sobre pasa los niveles óptimos.

En esta investigación, los niveles de K^+ que mostraron una respuesta óptima a los cultivos, en biomasa fresca, fueron los niveles 3(200Kg/Ha), 4(350Kg/Ha) y 5(500Kg/Ha), pero al obtener la misma respuesta del cultivo, el óptimo es el tratamiento 3(200Kg/Ha), para así evitar pérdidas económicas al aplicar excesos de fertilizante.

5.2 Volumen en fresco de la raíz.

Al analizar los datos obtenidos del experimento con respecto a la densidad radical, se puede observar que no existe un incremento lineal entre el volumen



de la raíz y la aplicación del fertilizante potásico en todos los tratamientos, por lo que se puede observar una tendencia negativa sobre la aplicación de este nutriente, esto se puede apreciar en las figuras 4, 5 y 6 donde se observa que la tendencia es potencial.

Sánchez *et al.*, 2006, investigaron que la aplicación de 4.0 y 8.0 Mm de K resultaron ser los tratamientos óptimos para una eficaz producción de biomasa radicular y foliar en las plantas de frijol ejotero, mientras que dosis deficientes de K, tiene como resultado un mayor crecimiento radicular y un reducido de crecimiento de la parte aérea. La dosis por encima de estos valores (4.0 y 8.0 Mm de potasio) se consideran tóxicas por la disminución de la parte radicular (Sánchez *et al.*, 2006).

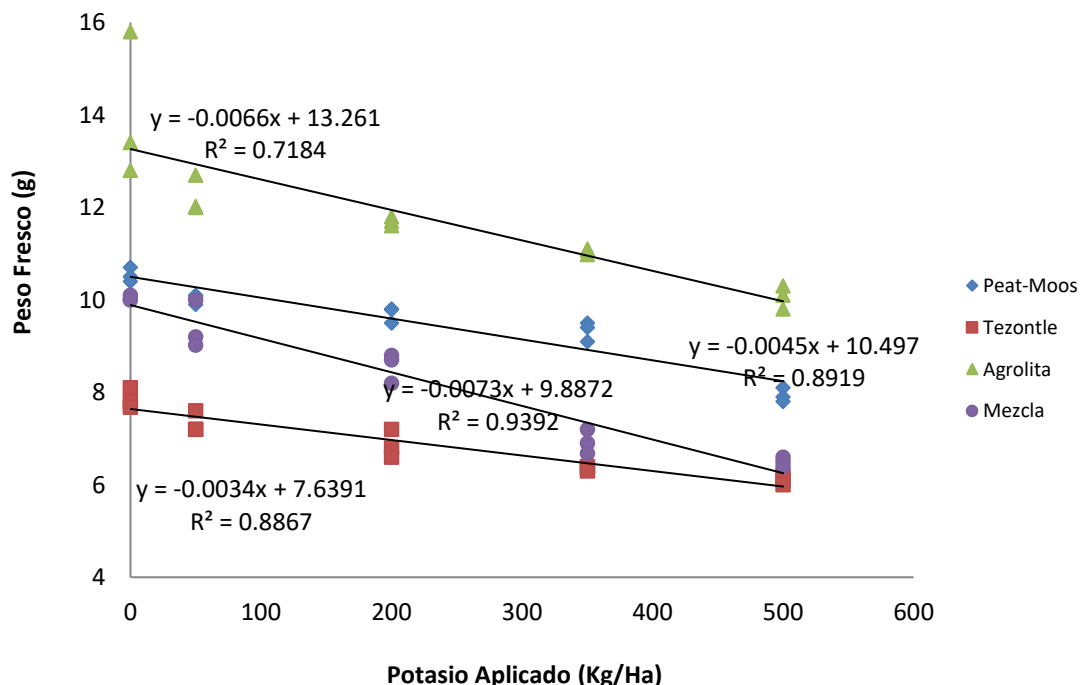


Figura 8. Peso fresco de la raíz del cultivo de avena en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

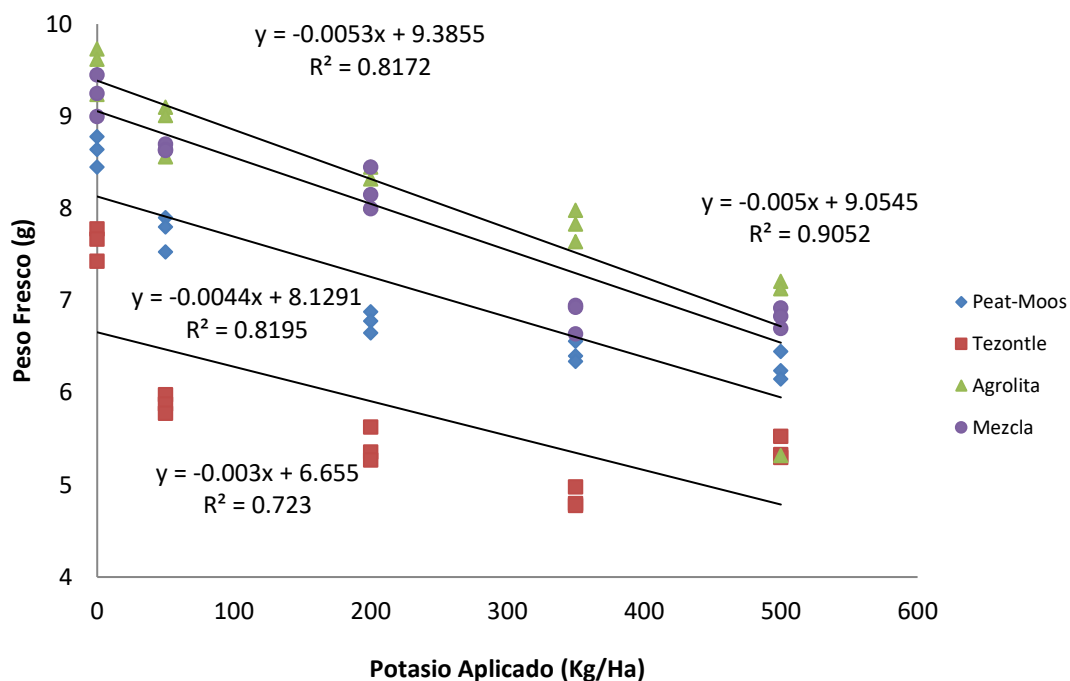


Figura 9. Peso fresco de la raíz del cultivo de cebolla en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

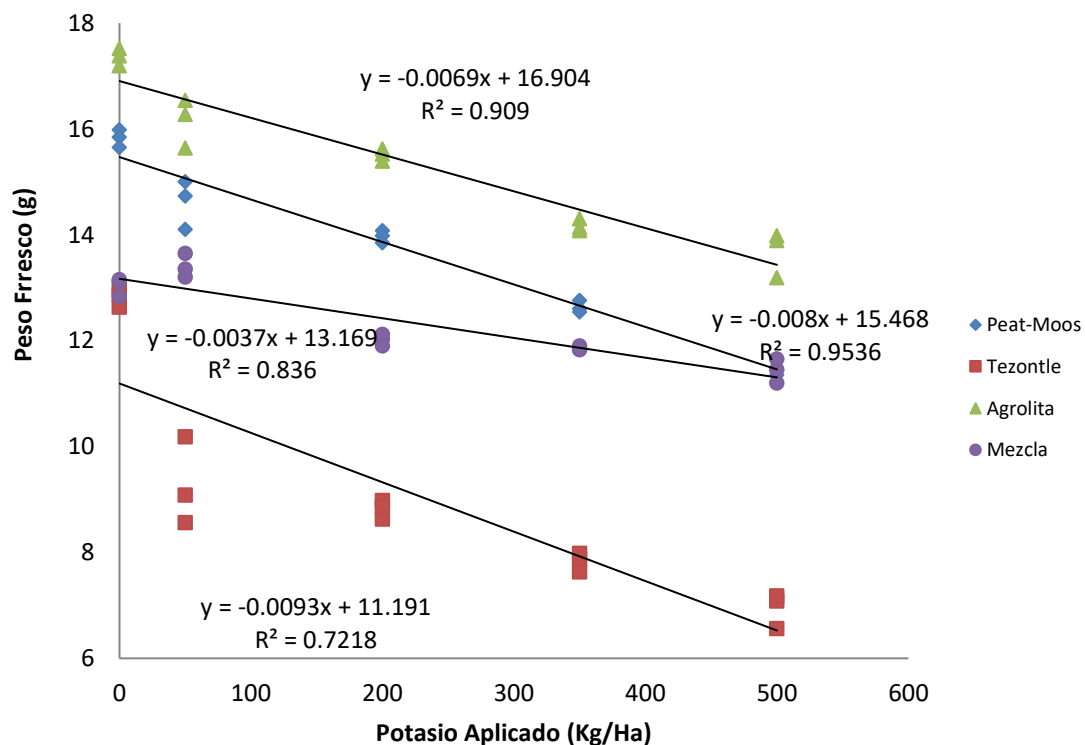


Figura 10. Peso fresco de la raíz del cultivo de frijol en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.



Rufty *et al.*, (1981) demostraron una relación estrecha entre la absorción y transporte de K^+/NO_3^- . Se ha comprobado que la limitación de K^+ afecta la asimilación de NO_3^- y el lugar donde se realiza este proceso (Foster y Jeschke, 1993; Siebrecht y Tischner, 1999).

Un adecuado aporte de K^+ incrementa la absorción y transporte de NO_3^- hacia la parte aérea, lo que produce un aumento de la disponibilidad de NO_3^- induciendo la actividad de la Nitrato-Reductasa (NR) en hojas (Ruiz Romero, 2000).

Por el contrario, cuando el K^+ es limitante se induce la traslocación de NO_3^- hacia afuera de las hojas produciéndose su asimilación preferentemente en las raíces (Blevinset *al.*, 1978; Foster y Jeschke, 1993).

5.3 Peso Seco (Parte aérea)

La respuesta de los cultivos a la aplicación del fertilizante potásico se vio afectado por el incremento en el peso seco de las diferentes especies, mostrando una tendencia lineal con los máximos pesos registrados en el tratamiento 4(350Kg/Ha) con incrementos de hasta 8g en relación con los valores mínimos presentados en el tratamiento 1(0Kg/Ha), esto es debido al sinergismo que existe entre el $K^+ - NO_3^-$ (Rufty *et al.*, 1981), definiendo al K^+ como un catión acompañante de los NO_3^- en la absorción (Blevins, 1985).

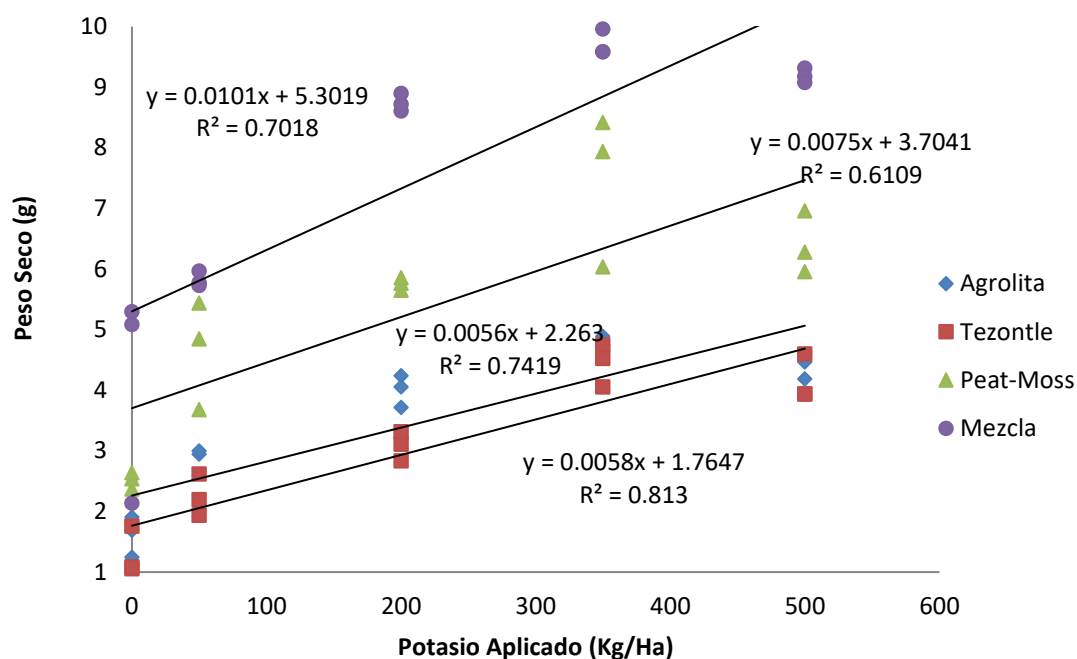


Figura 11. Peso seco de la parte aérea del cultivo de cebolla en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

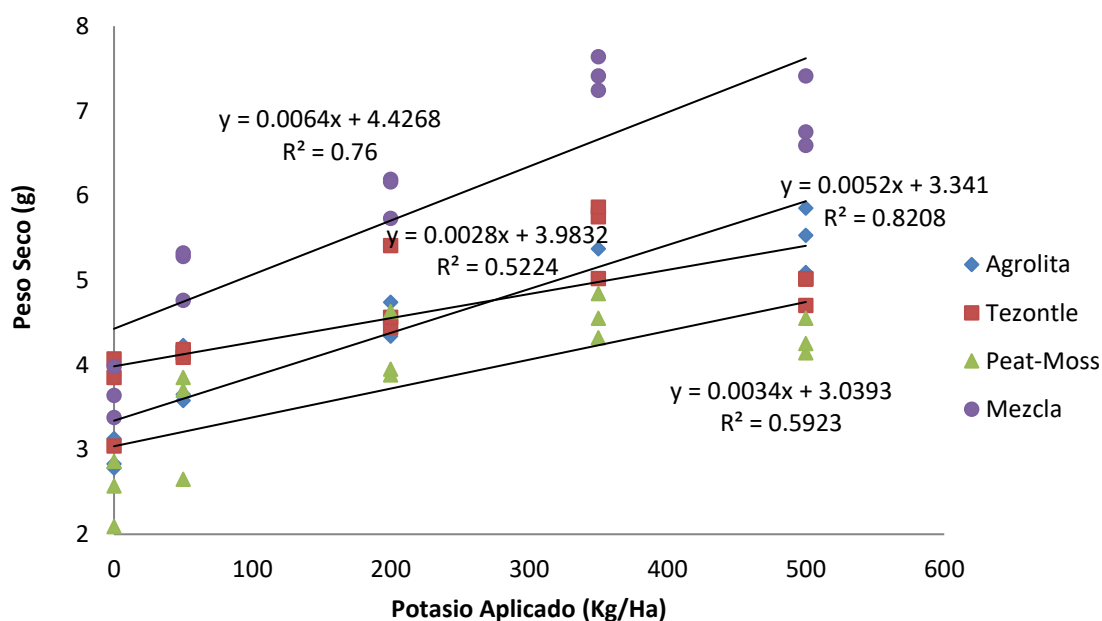


Figura 12. Peso seco de la parte aérea del cultivo de frijol en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

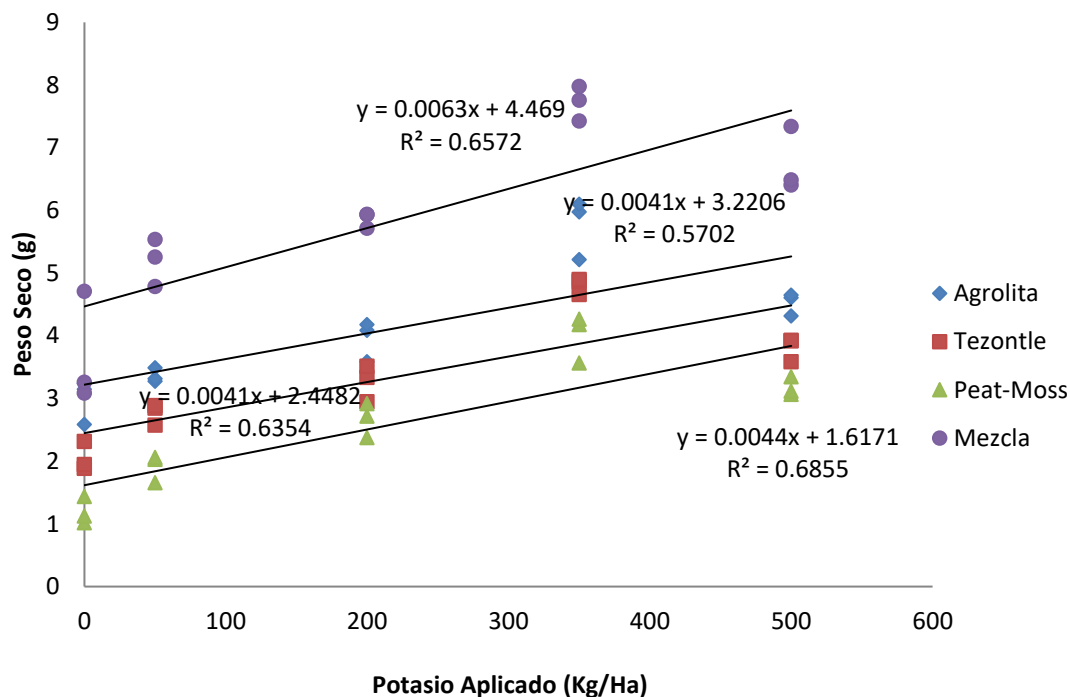


Figura 13. Peso seco de la parte aérea del cultivo de avena en 4 sustratos bajo diferentes niveles de K aplicado.

Por lo tanto se puede decir que existe una correlación directa en las tendencias con respecto a lo obtenido con el peso fresco (Parte aérea) debido a que en ambos resultados se observan la respuesta positiva de los cultivos al fertilizante potásico. Ruiz *et al.* (2000) definieron al potasio, después del nitrógeno, como el factor nutricional más determinante en la inducción de esta actividad enzimática y por lo tanto de la regulación de NO_3^- , subrayando la importancia de la fertilización potásica para el crecimiento y rendimiento en el cultivo del pepino. En definitiva, el potasio podría actuar de dos formas sobre la reducción de NO_3^- 1) Estimulando la absorción su traslocación hacia la parte aérea, lo que aumentaría su disponibilidad en este órgano y por lo tanto la actividad Nitrato-Reductasa, 2) Induciendo directamente a la actividad Nitrato-Reductasa (Sánchez *et al* 2006).



Sánchez *et al*, 2006, realizaron estudios en frijol ejotero, observando que la deficiencia y el exceso de potasio ejercen un efecto sobre el metabolismo nitrogenado similar al que produce el estrés por nitrógeno. Las plantas de frijol tratadas con dosis altas de potasio se caracterizan por presentar elevadas concentraciones de NO_3^- y NH_4^+ , mayor asimilación de compuestos nitrogenados (Sánchez *et al.*, 2006).

Esta investigación en particular concuerda con lo citado por Sánchez, 2006, debido a la reducción de biomasa aérea en los cultivos tratados, cuando estos fueron sometidos a concentraciones fuera de la optima que resultó, como ya se había mencionado del tratamiento 4 (350Kg/Ha). Otro punto esencial para el análisis es tener en cuenta que al no contar con un régimen de fertilización adecuado habría repercusiones en el potencial de producción de biomasa y se convierte esto en una limitante.

5.4 Densidad Radical con respecto a los sustratos

Con lo que respecta a la densidad radical de los cultivos se puede observar que las raíces del cultivo de frijol fueron aquellas que tuvieron mayor capacidad de absorción, debido a que son las que presentaron un mayor volumen de raíz con respecto de los otros cultivos en cuestión, y este se presentó en los cuatro sustratos analizados.

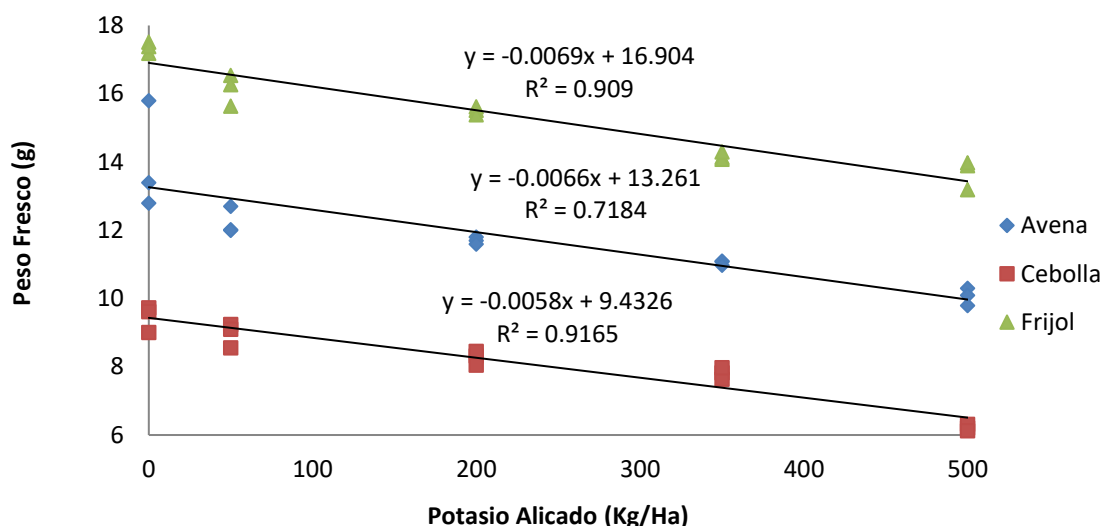


Figura 14. Respuesta del fertilizante potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Agrolita

Wiersun (1957) demostró que la capacidad de penetración radicular está directamente relacionada con el diámetro de las raíces. Estas entran en una determinada zona de suelo, con estructura porosa rígida, si su diámetro es menor que el de los respectivos poros. Cuando sucede lo contrario, la posibilidad de no penetración se traduce en la aparición de una concentración de raíces, bastante divididas; gruesas y con epidermis rugosa.

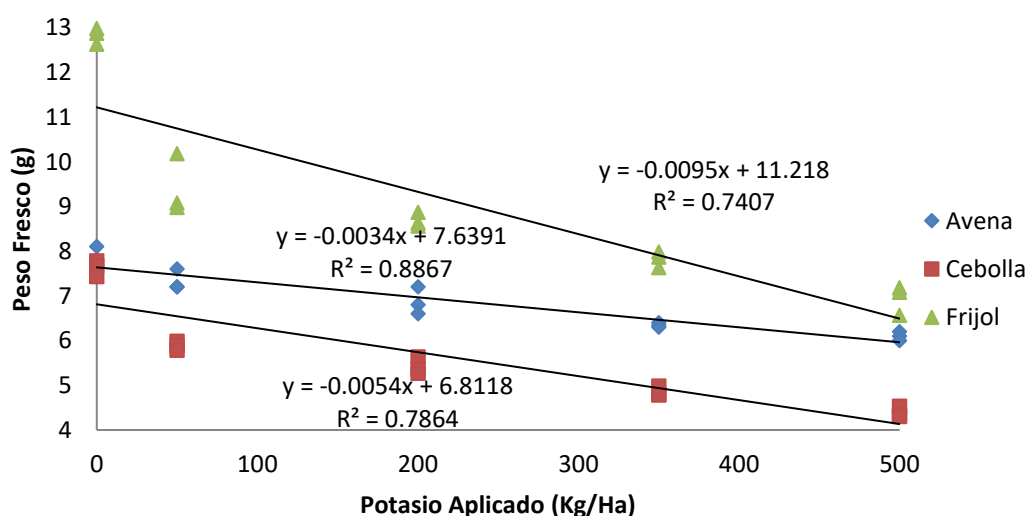


Figura 15. Respuesta del Fertilizante Potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Tezontle.

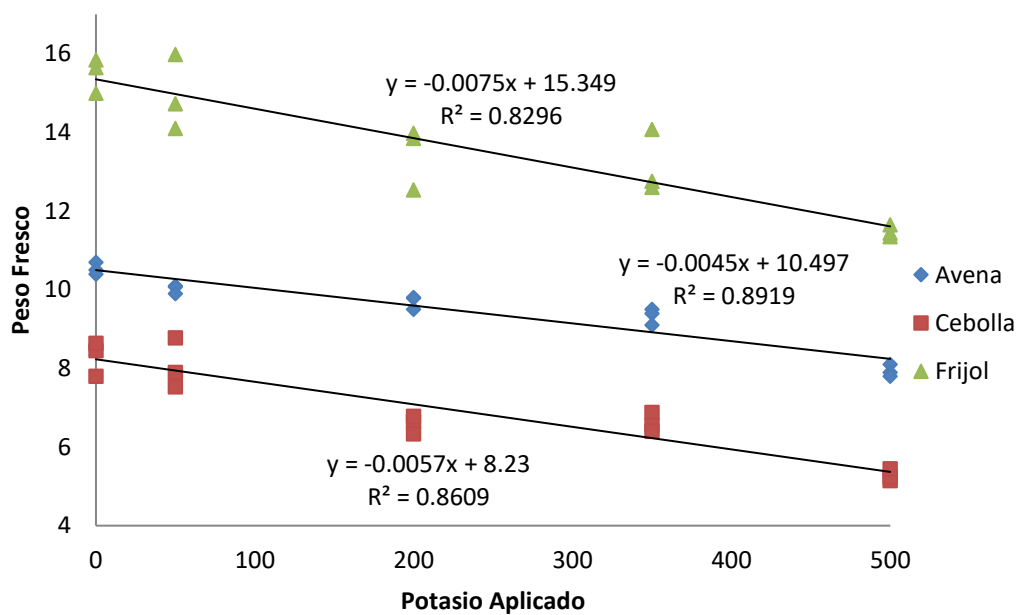


Figura 16. Respuesta del Fertilizante Potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Peat-Moss

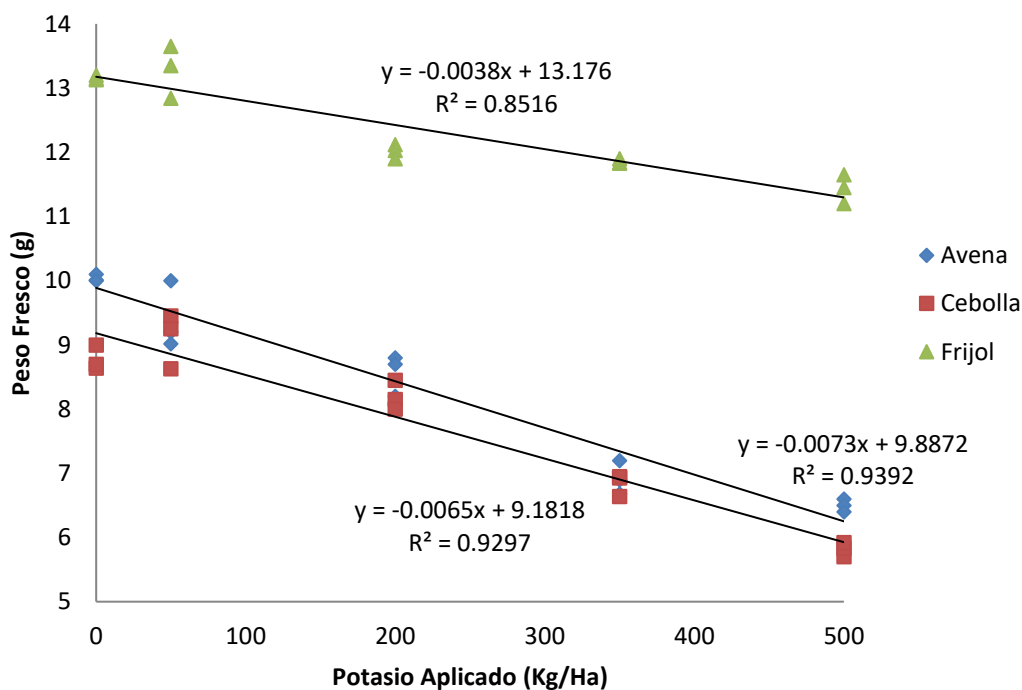


Figura 17. Respuesta del Fertilizante Potásico con respecto a la densidad radical en el sustrato de Mezcla.

Nash y Boligar (1974) en condiciones controladas, observaron que el máximo crecimiento radicular de la soja (*Glycinemax* (L)) ocurrió, cuando existía una combinación de 25% de arcilla, 25% de limo y 25% de arena. La arcilla, entre



los gramos de arena, reduce la resistencia al desplazamiento de éstas, lo que permite el alargamiento. Sin embargo, en condiciones naturales, los suelos presentan agregados o estructuras compuestas que complican el mecanismo de alargamiento radicular.

Zimmerman y Kardos (1961) estudiaron la restricción al desarrollo radicular en suelos compactados, cita como factores limitantes la falta de nutrientes y agua disponible. Day y Holmgreen (1952) a su vez señala que la compactación afecta la difusión del oxígeno, lo cual restringe el crecimiento radicular.

La caracterización de horizontes en términos de la resistencia a la penetración radicular puede ser realizada por la determinación de la densidad aparente, mediante el empleo de penetrómetros, etc.

Veimmeyer y Hendrickson (1948) encontraron en suelos compactados artificialmente, valores críticos de la densidad aparente para la penetración radicular del girasol; 1,7 a 1,8 g/cm³ en suelos arenosos, 1,5 g/cm³ para suelos arcillosos. Grohmann y Queiroz Neto (1966) en muestras de suelos, compactados artificialmente, donde fue plantado arroz, observaron que no había desarrollo radicular, cuando la densidad aparente era 1,42 y 1,38 g/cm³ respectivamente.

Dasberg y Bakker (1970) encontró buena correlación ($r: 0,82$) entre aireación penetración y distribución radicular fue afectada por una deficiente aireación.



VI. – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La absorción del fertilizante potásico es función de la densidad radical que presenta cada especie.
- La realización de las curvas de acumulación de materia seca y absorción de potasio para frijol, maíz y avena, permite obtener algunos de los parámetros requeridos para generar el valor del Requerimiento Interno Nutricional de Potasio para estas especies; y poder así calcular la Demanda Nutricional de éste elemento para cada uno de los cultivos en estudio.
- Por lo tanto es recomendable que se efectúen mas investigaciones con respecto de la densidad radical de los cultivos ya que como esta investigación demostró, es de suma importancia.



VII. - REVISION DE LITERATURA

- Abad, M. 1993. Sustratos. Características y propiedades. pp. 47-62. In: Cultivo sin suelo. F. Canovas y J. Díaz. (ed). Instituto de Estudios Almerienses. FIAPA.
- Abad, M. 1993b. Inventario y características. pp. 65-80. In: Cultivo sin suelo. F. Canovas y J. Díaz. (ed). Instituto de Estudios Almerienses. FIAPA.
- Ansorena, J. 1995. Propiedades físicas de los sustratos. Chile Agrícola, 20(208): 217-218.
- Baca, C. G. A., B.S. Alcalde, G. A. Martínez, L. R. James, I. D. Barrera. 1991. Efecto de la solución nutritiva, riego, el sustrato y la densidad de siembra en tres cultivos hortícolas en la hidroponia al aire libre. II Melon y jitomate. Agrociencia 2:33-55.
- Badraqui, M., P. R. Bloom and A. Delmaki. 1992. Mobilization of non-exchangeable K by ryegrass in five Moroccan soils with an without mica. Plant and Soil 140: 55-63.
- Beckett. P. H. T. 1972. Critical cation activity ratios. Adv. Agron. 24: 376-412.
- Bekker, A. W., N.V. Flue and R. G. Chase. 1994. Effects of liming. K fertilization and leaching on K retention, nutrient uptake and dry matter production of maize grown on a Samoan Oxic Inceptisol. Fertilizer research. 38: 123-130.



- Benton, J. Jr., B. Wolf and H. A. Mills. 1991. Plant Analysis Handbook: A Practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro Pub., Inc. 213 p U.S.A.
- Besford, R. T. 1975. Effects of potassium nutrition on leaf protein concentrations and growth of young tomato plants. Plant and soil 42: 441-451.
- Blevins, D. C. 1985. Role of potassium in protein metabolism in plants. *In*: Munson, R. D. (ed) Potassium in Agriculture. American Society of Agronomy. Madison. WI. USA. P 413-424.
- Blevins, D. C.; Hiatt, A. J.; Lowe, R. H. y Leggett, J. E. 1978. Influence of K on the uptake, traslacion, and reduction of nitrate by barley seedlings. Agron. J. 70:393-396.
- Bugarin, M. R. Simulación de la demanda y suministro edáfico de potasio en tomate. Tesis de Doctor en Ciencias. Universidas de Colima, Mexico. 2002. 157 p.
- Bures, S. 1999. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid. 220 p.
- Camacho Ferre F., J. C. Tello Marquina. 2006. Control de patógenos telúricos en cultivos hortícolas intensivos. Ed. Agrotecnicas. Madrid, España. 160p.
- Carlite, W. 1999. The effects of the enviroment lobby on the selection and use of growing media. Acta Horticulturae. 481. 587-596.
- Caron, J y Nkongolo, V. 1999. Aeration in growing media: recents developments. Acta Horticulturae. 481: 545-551.
- Castellanos, J. Z. 2004 Manejo de la fertirrigación en suelo. *In*: Manual de



producción hortícola en Invernadero. J. Z. Castellanos . 2^a ed. INTAGRI. México. pp 103-107.

Castellanos, J. Z., P. Vargas Tapia. 2003. El uso de sustratos en la horticultura bajo invernadero. In: Manual de producción hortícola en Invernadero. J. Z. Castellanos . 2^a ed. INTAGRI. México. pp 124-150.

Day, P. R. y Holmgreen, G. 1952. Microscopic changes in soil structure during compression. Proc. Scil Sci. Soc. Am., 16 (1): 73-77.

De Boodt, M., Verdonck, O. y Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. Acta Horticulturae. 37: 2054-2062
different horticultural substrates. Acta Horticulturae, 150:161-167.

Dominguez V. A. 1997. Tratado de la Fertilizacion. 3ra Edición. Mundi-prensa. España. 613p.

During, C. and D. M. Duganzich. 1979. Simple empirical intensity and buffering capacity measurements to predict potassium uptake by white clover. Plant and Soil 51: 167-176.

During, C. and D. M. Duganzich. 1979. Simple empirical intensity and buffering capacity measurements to predict potassium uptake by white clover. Plant and Soil 51: 167-176.

Egilla, J. N. and F. T. Davies, Jr. 1995. Response of Hibiscus rosa sinensis L. to varying levels of potassium fertilization: growth, gas exchange and mineral element concentration. J of Plant Nutrition 18: 1765-1783.

Evangelou, V. P., J. Wang and R. E. Phillips. 1994. New developments and



perspectives on soil potassium quantity/intensity relationships. *Adv. Agron.* 52:173-227.

Evans, H. J. y Sorger, G. J. 1966. Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. *Annu. Rev. Plant physiol.* 17:47-77.

Evans, H.J., and G. J. Sorger. 1966. Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 17: 47-87.

Feigenbaum, S., R. Edelstein and I. Shainberg. 1981. Release rate of potassium and structural cations from micas to ion exchangers in dilute solutions. *Soil Science Soc. Am. J.* 45: 501-506.

Foster, J. C. y Jeschke, W. D. 1993. Effects of potassium on nitrate transport and on the contribution of the root to nitrate reduction in the whole plant. *J. Plant Physiol.* 14:322-328.

Galvis, S. A. 1998. Diagnostico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de Doctor en Ciencias. IRENAT, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Mexico. 327 p.

Grohmann, F. Queiroz Neto, J. P. 1966. Efeito da compactação artificial do solo limo-argiloso sobre a penetração das raízes de arroz. *Bragantia* 25 (8): 421-431.

Goss, R. L. 1968. The effects of potassium on disease resistance. In: *The Role of Potassium in Agriculture*. Ed. by V.J. Kilmer. S.E. Younts and N.C. Brady. Amer. Soc. of Agron. Pp 221-241.



- Hao, X., A. P. Papadopoulos. 2002. Growth, photosynthesis and productivity of greenhouse tomato cultivated in open o closed rockwool system. Can. J. Plant Sci. 82:771-780.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale and W. L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizer. An introduction to nutrient management. 6th edition. Prentice Hall 499 p U.S.A.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. Academic Press, San Diego. 365 p.
- Hsu, Y., Tseng, M. Y Lin, Chi. 1996. Container volume affects growth and development of wax apple. HortScience, 31(7):1139-1142.
- Humble, G. D. y Raschke, K. 1971. Stomatal opening quantitatively related to potassium transport. Plant physiol. 48: 447-453.
- Inden H., A. Torres. 2004. Comparison of four substrate on the growth and quality of tomatoes. Acta Hort. 644: 205-210.
- Kauffman, M. D. and D. R. Bouldin. 1967. Relationships of exchangeable and non exchangeable potassium in soils adjacent to cation-exchange resins and plant roots Soil Science 104: 145-150.
- Kauffman, M. D. and D. R. Bouldin. 1967. Relationships of exchangeable and nonexchangeable potassium in soils adjacent to cation-exchange resins and plant roots. Soil Science 104: 145-150.
- Knudsen D., G. A. Peterson and P. F. Pratt. 1989. Lithium, sodium and potassium. In: methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Ed. By A. L. Page, R. H. Miller and D. R.



Keeney. Series Agronomy 9.^{2nd} ed. pp 225-246.

Le Bot, J. S. Adamowicz y P. Robin. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Sci Hort.* 74: 47-82.

Liebhardt, W. C. 1969. Effect of potassium on carbohydrate metabolism and translocation. In: *The Role of Potassium in Agriculture*. Ed. by V.J. Kilmer, S.E. Younts and N.C. Brady Amer. Soc. of Agron. pp 147-163.

Loneragan, J. F. 1997. Plant nutrition in the 20th and perspectives for the 21st century. *Plant and soil* 196: 163-174.

Lumbanraja, J. and V. P. Evangelou. 1992. Potassium quatity-intensity relationships in the presence and absence of NH_4 for three Kentucky Soil. *Science* 154:366-376.

Marschner, H. 1986. Mineral nutrition on higher plants. Academic press. London, U. K. 674 p.

Memon, Y. M., I. F. Fergus, J. D. Hughes and D. W. Page. 1988. Utilization of nonexchangeable soil potassium in relation to soil type, plant species and stage of growth. *Aust. J. Soil Res.* 26: 489-496.

Mengel, K. 1980. Factors of plant nutrient availability relevant to soil testing. *Plant and Soil* 64:129-138.

Mengel, K. 1980. Factors of plant nutrient availability relevant to soil testing. *Plant and Soil* 64: 129-138.



- Mengel, K. and E. A. Kirkby, 1980. Potassium in a crop production. *Adv. Agron.* 33: 59-110.
- Mengel, K. and R. Busch. 1982. The importance of the potassium buffer power on ten critical potassium level in soils. *Soil Science* 133: 27-32.
- Mengel, K. and Uhleubecker, K. 1993. Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass. *Soil Science Soc. Amer. J.* 57: 761-766.
- Mengel, K. Rahmatullah and H. Dou. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-derived soils. *Soil Science* 163: 805-813.
- Mengel, K., Rahmatullah. 1994. Exploitation of potassium by various crop species from primary minerals in soils rich in micas. *Biol. Fert. Soils* 17: 75-79.
- Meyer, D. and A. Jungk. 1993. A new approach to quantify the utilization of nonexchangeable soil potassium by plant. *Plant and Soil* 149: 235-243.
- Miller, R. Y Donahue, R. 1995. *Soil in your environment*. Prentice Hall, New Jersey. 649 p.
- Mollitor, H., Faber, A., Marutzky, R., and Springer., S. 2004. Peat substitute on the basis of recycled wood chipboard. *Acta Horticulturae* 644: 123-130.
- Mutscher, H. 1997. *Measurement and Assessment of Soil Potassium*. International Potash Institute. Bern, Switzerland.



- Nair, K. P. P. 1996. The buffering power of plant nutrients and effects on availability. *Adv. Agronomy*. 57: 237-287.
- Nair, K. P. P., A. K. Sadanandan, S. Hanza and J. Abraham 1997. The importance of potassium buffer power in the growth and yield of cardamon. *J. of Plant Nutrition* 20: 987-997.
- Nash, V. y Baligar, V. C. 1974. The growth of soybean (*Glycine max*) root ins relation to soil micromorphology *Pl Soil* 41 (1): 81-89.
- Nelson, P. 1998. *Greenhouse operation and mangement*. Prentice Hall, New Jersey. 637 p.
- Németh, K. 1975. The effect of fertilization and K removal by ryegrass in pot experiments on the K concentration of the soil solution of various soils .*Plant and Soil* 42: 97-107.
- Németh, K., K. Mengel and H. Grimme. 1970. The concentration of K, Ca. And Mg in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca and Mg. *Soil Science* 109: 179-185.
- Nicolas, H y Cruiziat, P. 1992. L´eau dans la plante in “L´irrigation en horticulture, pépinière et plans en pots”. CNIH Ed. Paris: 5-19
- Novozamsky, y I. and V.J.G. Houba. 1987. Critical evaluation of soil testing methods for K. In: *Methodology in Soil-K Research*. Proccedings of the 20° colloquium of the International Potash Institute held in Baden bei Wien. Int. Potash Inst. Worblaufen-Bern/Switzerland, pp.177-197.
- Osaki. M., T. Shinano and T. Tadano. 1993. Effect of nitrogen, phosphorus, or



potassium deficiency on the accumulation of Ribulose-1,5-Biphosphate carboxylase /oxygenase and chlorophyll in several field crops. Soil Sci. Plant Nutr. 39: 417-425.

O'Toole, J.C., K. Treharne, M. Turnipseed, K Crookston and J. Ozbun. 1980. Effect of potassium nutrition on leaf anatomy and net photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* L. New Phytol. 84:623-630.

Papadopoulos, A. P. 1991. Growing greenhouse tomatoes in soil and soilless media. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, ON. Publ. 1865/E. 79p.

Pastor, J. 1999. Utilización de sustratos en viveros. Terra, 17(3):231-235.

Rasnake, M. and G. W. Thomas. 1976. Potassium status of some alluvial soils in Kentucky. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 883-886.

Richards, J. E. and T. E. Bates. 1988. Studies on the potassium-supplying capacities of southern Ontario soils. III. Measurement of available K. Can. J. Soil Science. 69: 597-610.

Richards, J. E., T. E. Bates and S. C. Sheppard. 1988. Studies on the potassium-supplying capacities of southern Ontario soils. I. Field and greenhouse experiments. Can. J. Soil Science. 68: 138-197.

Riviere, L. y Caron, J. 2001. Research in substrates: state of the art and need for the coming 10 years. Acta Horticulturae, 548: 29-37.

Rodríguez, S.J. y A. Galvis-Spinola . 1989. Dinamica del potasio en los suelos del país. Pontificia Universidad Catolica de Chile. Santiago de Chile.



- Rufty, T. W. Jr.; Jackson, W. A. y Raper C. D. R. J. 1981. Nitrate reduction in roots as affected by the presence of potassium and by flux of nitrate through the roots. *Plant. Physiol.* 68:605-609.
- Ruiz, J. M. y Romero, L. 2002. Relationship between potassium fertilization and nitrate assimilation in leaves and fruits of cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Assoc. Appl. Biol.* 140:241-249.
- Ruiz, J. M. y Romero, L. 2000. Nitrogen metabolism and yield response of cucumber (*Cucumis sativus* L. Cv. *Brumex*) plants to phosphorus fertilization. *J. Sci. Food Agric.* 80:2069-2073.
- Ruiz, J. M.; Castilla, N.; y Romero, L. 200. Nitrogen metabolism in pepper plants applied with different bioregulators. *J. Agric. Food Chem.* 48:2925-2929.
- Sánchez, C. E., Soto, P. J. M., Ruiz, S. J. M., Romero, M. L. 2006. Biomasa, actividad enzimática y compuestos nitrogenados en plantas de frijol ejotero bajo diferentes dosis de potasio. *Agricultura Técnica en México.* Vol. 32 Num 1. p 27-37.
- Schneider, A. 1997. Short-term release and fixation of K in calcareous clay soils. Consequence for K buffer power prediction. *European Journal of Journal o Soil Science* 48: 499-512.
- Schpuwenburg, J. Ch. Van and A.C. Schuffelen, 1963. Potassium-exchange behaviour of an illita. *Neth. J. Agric. Sci.* 11: 13-22.
- Scott, A. D. and T. E. Bates. 1962. Effect of organic additions on the changes in



exchangeable potassium observed on drying soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 25: 209-210.

Siebrecht, S. y Tischner, R. 1999. Changes in the xylem exudates composition of poplar (*Populus treniula* x *P. alba*) dependent on the nitrogen and potassium supply. J. Exp. Bot. 50:1797-1806.

Sparks, D. L. 1985. Kinetics of ion reactions in clay minerals and soil. Adv. Agron. 38: 231-266.

Sparks, D. L. 1987. Potassium dynamics in soils. Adv. Soil Science. 6: 1-63

Streeter, J. G. y Barta, A. L. 1984. Nitrogen and minerals, *In*: Munson, R. D. (ed) Physiological basis of crop growth and development. American Society of Agronomy. Madison. WI. USA. P. 175-200.

Sweeney, W. D., G. V. Granade, M.G. Eversmeyer and D.A. Whitney. 2000. Phosphorus, potassium, chloride, and fungicide effects on wheat yield and leaf rust severity. J. Plant Nutrition 23 (9): 1267

Tisdale, S. L., W. L. Nelson and J. D. Beaton. 1990. Soil fertility and fertilizers. 4th edition. MacMillan Publishing Co., 754 p. U. S. A.

Unruh, B. L., J.C. Silvertooth and D. M. Hendricks. 1994. Potassium fertility status of several Sonoran desert soils. Soil Science 158: 435-441.

Valdivia Valentín, M. A. 1989. Prueba de diferentes sustratos para la producción de jitomate, (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponía bajo invernadero rústico. Tesis Profesional, Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 105 p.



- Verdonck, O., Penninck, R., and De Boodt, M. 1983. The physical properties of
- Viehmeyer, F. J. y Hendrickson, A. H. 1948. Soil density and root penetration Soil Sci 65 (4): 487-493.
- Villarreal, R. M., E. R. Garcia, E. T. Osuna, B. A. Armenta. 2002. Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y calidad y calidad de poscosecha de tomate en fertirriego. Terra 20:311-320.
- Wada, S. I. and K. Odahara. 1993. Potassium-calcium Exchange in five Ap soils from paddy fields and its effect on potassium concentration in soil solution. Soil Sci. Plant Nutr. 39: 129-138.
- Wiersum, L. K. 1957. The relationship of the size and structural rigidity of fores to their penetration by root PI Soil 9 (1): 75-85.
- Wilson, R. H. and H.J. Evans, 1968. The effect of potassium and other univalent cations on the conformation of enzymes. In: The Role of Potassium in Agriculture. Ed. by V.J. Kilmer, S.E. Younts and N.C. Brady. Amer. Soc. of Agron. pp 189-202.
- Woodruff, C. M. 1955. Ionic equilibria between clay and dilute salt solutions. Soil Science Soc. Am. Proc. 19: 36-40.
- Zimmerman, R. P. y Kardos, L. T. 1961. Effects of bulk density on root growth Soil Sci. 91 (3): 280-288.