

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



LA INTERACCIÓN K:Ca AFECTA EL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO,
NUTRICIÓN Y CALIDAD DEL FRUTO DE TOMATE EN SISTEMA DE
CULTIVO SIN SUELO

Tesis

Que presenta OBED ISAI HERNÁNDEZ PÉREZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

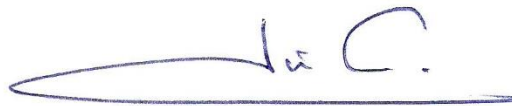
Saltillo, Coahuila

Diciembre 2015

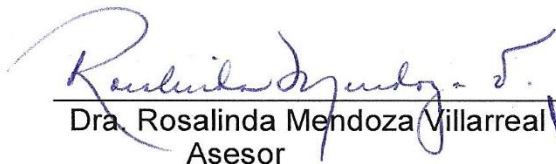
LA INTERACCIÓN K:Ca AFECTA EL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO,
NUTRICIÓN Y CALIDAD DEL FRUTO DE TOMATE EN SISTEMA DE CULTIVO
SIN SUELO

Tesis

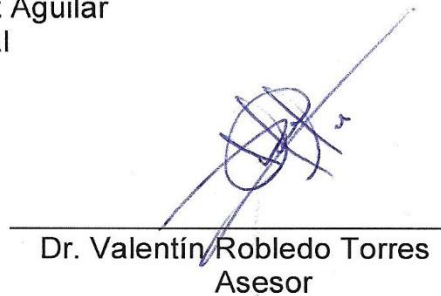
Elaborada por OBED ISAI HERNÁNDEZ PÉREZ como requisito parcial para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS HORTICULTURA con la
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Asesor Principal



Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Asesor



Dr. Valentín Robledo Torres
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Postgrado
UAAAN

AGRADECIMIENTOS

A la gloriosa Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por permitirme continuar con mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, gracias por brindarme su apoyo incondicional. Por todos los valiosos conocimientos que compartió conmigo, pero sobre todo por su amistad y amable disposición para dirigir esta investigación.

Al Dr. Irán Alía Tejacal, por el apoyo en el trabajo y análisis de laboratorio que fue parte fundamental para cumplir con los objetivos de esta investigación. Gracias por compartir sus conocimientos.

A la Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal, por el apoyo en la revisión del trabajo de investigación.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel, por el apoyo en la revisión del presente trabajo.

Al Dr. Valentín Robledo Torres, por su colaboración en la revisión de este trabajo de investigación.

A todos y cada uno de los profesores de la maestría, por participar en mi preparación y formación profesional.

T.A. Martina De La Cruz Casillas, por su apoyo para la realización del trabajo de laboratorio.

DEDICATORIAS

A *Díos* por darme la vida, por guiarme y acompañarme en esta etapa de mi vida. Por darme sabiduría e inteligencia, llenarme de alegría y colmarme de bendiciones en mi vida.

Con mucho amor a mis padres *Abenamar Hernández López* y *María Antonieta Pérez Vázquez*, por su máximo esfuerzo e hicieron todo en la vida para lograr mis sueños.

A Mis Hermanos *Joel Avidam* y *Merli Karina* por el apoyo, consejos y motivación. A pesar de todos los obstáculos que nos enfrentamos, juntos salimos adelante y desde hoy gozamos de esta satisfacción tan grande para nosotros y para nuestros padres.

A mi esposa *María Lilia Campos Ramírez*, por ser mi mayor motivación para superarme, por los consejos, apoyo y por estar siempre conmigo. Todo esto hizo posible alcanzar este propósito tan grande en mi vida.

A mis hijos *Jonathan Hernández Campos* y *Marian Alexia Hernández Campos*, por ser mi mayor fuerza, motivación y mi motor a diario para superarme y alcanzar una meta más en mi vida.

A mis suegros *Juan Campos Baeza* y *Mariana Ramírez Pérez*, por su apoyo incondicional y por el esfuerzo que hicieron para lograr este objetivo en mi vida.

A mis amigos:

Armando Hernández Pérez por su apoyo incondicional y amistad que me ha brindado.

A *Martín, Yesí, Toño, Víctor* y *Joaquín* por su amistad y apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
Hipótesis.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Función del potasio en la planta.....	3
Función del calcio en la planta.....	4
Función del potasio en calidad del tomate.....	5
Función del calcio en la calidad del tomate.....	6
Absorción de potasio.....	7
Transporte de potasio dentro de la planta.....	8
Absorción de calcio.....	9
Transporte del Calcio dentro de la planta.....	10
Antagonismo entre potasio y calcio.....	11
Antagonismo entre potasio y magnesio.....	12
Antagonismo entre calcio y magnesio.....	12
Antagonismo entre potasio calcio y magnesio.....	13
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
CONCLUSIONES.....	33
LITERATURA CITADA.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de azúcares totales y azúcares reductores en frutos de tomate cv. clermon.	20
Figura 2. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de almidón de los frutos de tomate cv. clermon.....	21
Figura 3. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de licopeno y carotenoides totales en frutos de tomate cv. clermon.....	21
Figura 4. Efecto de la interacción K:Ca en el rendimiento y peso seco total de plantas de tomate cv. clermon.	24
Figura 5. Efecto de la interacción K:Ca en la altura de la planta de tomate cv. clermon.	24
Figura 6. Efecto de la interacción K:Ca en la firmeza del fruto de tomate cv. clermon.	25
Figura 7. Efecto de la interacción K:Ca en el color del fruto de tomate cv. clermon.	25
Figura 8. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de k en raíz de tomate cv. clermon.....	27
Figura 9. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de k y p en la parte aérea en tomate cv. clermon.....	28
Figura 10. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de k, ca y mg en fruto de tomate cv. clermon.....	30

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Concentración de macronutrientes de las soluciones nutritivas estudiadas obtenida de la relación K:Ca.....	15
Cuadro 2. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de azúcares totales, azúcares reductores, almidón, licopeno y carotenoides totales en los frutos de tomate cv. Clermon.....	20
Cuadro 3. Efecto de la interacción K:Ca en el rendimiento, peso seco total, firmeza, altura y color en frutos de tomate cv. Clermon.....	23
Cuadro 4. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de macronutrientes en raíz de tomate cv. Clermon.....	26
Cuadro 5. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de macronutrientes en parte aérea en tomate cv. Clermon.....	28
Cuadro 6. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de macronutrientes en fruto de tomate cv. Clermon.....	29

RESUMEN

**LA INTERACCIÓN K:Ca AFECTA EL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO,
NUTRICIÓN Y CALIDAD DEL FRUTO DE TOMATE EN SISTEMA DE
CULTIVO SIN SUELO**

POR

OBED ISAI HERNÁNDEZ PÉREZ

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR -ASESOR-

SALTILLO, COAHUILA. DICIEMBRE DE 2015

La nutrición con potasio (K) y calcio (Ca) en tomate están relacionados con la calidad del fruto y un suministro desbalanceado de estos puede disminuir la calidad y rendimiento. El objetivo del estudio fue comparar diferentes proporciones de K:Ca en el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto de tomate. Los tratamientos evaluados consistieron en 12 soluciones nutritivas (SN) con cuatro concentraciones de K (7, 9, 11 y 13 meq L⁻¹) y tres de Ca (9, 11 y 13 meq L⁻¹), el diseño utilizado fue el de bloques completos al azar con un arreglo factorial 4x3. El rendimiento y biomasa total por planta aumenta con el incremento de la concentración de K a 9 meq L⁻¹ en la SN. Las concentraciones de azúcares totales, azúcares reductores y almidón tienden a incrementar con el aumento de la concentración de K en la SN, pero disminuye cuando la concentración de Ca es mayor a 9 meq L⁻¹; este mismo efecto se registró para licopeno y la firmeza de fruto, no obstante, la mayor firmeza se presentó con 13 meq L⁻¹ de Ca y 11 meq L⁻¹ de K. La concentración de carotenoides totales decreció con el aumento de la concentración de K de 9 y 11 meq L⁻¹, pero con 13 meq L⁻¹ este aumentó. El aumento de la concentración de Ca en la SN disminuye la concentración de K en el fruto y un aumento de la concentración de K y Ca en la SN disminuye la concentración de Mg. Concentraciones de 9 meq L⁻¹ de K y 11 meq L⁻¹ de Ca se obtiene una mejor concentración de K en el fruto. Estos resultados sugieren que a mayor concentración de K, aumenta el rendimiento y calidad de los frutos, mientras que el Ca los disminuye, a excepción de la firmeza y carotenoides totales.

Palabras clave: Calcio/Potasio, azúcares totales, azúcares reductores, licopeno, rendimiento.

ABSTRACT

**THE INTERACTION K:Ca AFFECTS GROWTH, YIELD, NUTRITION AND
TOMATO FRUIT QUALITY IN SYSTEM SOILLESS**

BY

OBED ISAI HERNÁNDEZ PÉREZ

**MASTER OF SCIENCE IN HORTICULTURE
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR -ADVISOR-

SALTILLO, COAHUILA. DECEMBER 2015

Nutrition with potassium (K) and calcium (Ca) are related to fruit quality and an unbalanced proportion of these nutrients can decrease the quality and yield. The aim of this study was to compare different ratios of K: Ca on growth, yield and quality of tomato fruit. The treatments consisted of nutrient solutions (NS) with four levels of K (7, 9, 11 and 13 meq L⁻¹) and three of Ca (9, 11 and 13 meq L⁻¹), using a complete randomized block design with a factorial arrangement 4x3. The yield and total plant biomass increased with increasing concentration of K to 9 meq L⁻¹ in the NS. The concentration of total sugars, reducing sugars and starch tend to increase with increasing K concentration in the NS, but decreased when Ca concentration was increased to 9 meq L⁻¹; this same effect was recorded for lycopene and firmness of the fruit, however, the strongest was observed with 13 meq L⁻¹Ca and 11 meq L⁻¹ K. The total carotenoid concentration decreased with increasing concentration K from 9 and 11 meq L⁻¹ but with 13 meq L⁻¹ this increased. Increasing the concentration of Ca in the NS was associated with a K concentration decrease in the fruit and increased the concentration of K and Ca in the NS caused Mg concentration decreases. Concentrations of 9 meq L⁻¹ K and 11 meq L⁻¹ Ca better concentration of K in the fruit was obtained. According to the results, it is suggested that the higher the concentration of K, increases the yield and fruit quality, while the decrease Ca except firmness and total carotenoids.

Keywords: Calcium/Potassium, total sugars, reducing sugars, lycopene, yield

INTRODUCCIÓN

El tomate es una especie de gran importancia económica a nivel mundial y se ha convertido en una de las hortalizas más populares y cultivadas en todo el mundo, siendo la base de una importante agroindustria. Sus frutos, además de consumirse frescos, se procesan para la obtención de salsas, sopas, purés, zumos, concentrados, conservas, etc. (Martínez *et al.*, 2012). Para México es muy importante la exportación de este producto para su economía y actualmente ocupa el primer lugar en exportación de esta hortaliza principalmente a mercado de Estados Unidos (SAGARPA, 2015) pero, cada día la competitividad en calidad de este producto está creciendo. Para mejorar la calidad del fruto es muy importante la nutrición de la planta y los dos nutrimentos más relacionados con lo anterior son el potasio y calcio. Sin embargo, la principal preocupación es el efecto de la interacción de estos nutrimentos y esto ocurre cuando el abastecimiento de un nutriente afecta la absorción de otros nutrientes, por un exceso de concentración, esto pueden ocurrir en la superficie de la raíz o dentro de los tejidos de la planta. Pueden formarse precipitados o complejos entre iones por su capacidad de formar vínculos químicos o presentar una competencia entre iones con propiedades tan similares por el sitio de absorción, transporte y función, esto se presenta entre nutrimentos de similar tamaño, carga y configuración electrónica, como Ca, Mg, K, y Na. Pero la respuesta a la interacción se puede presentar en sinergismo o un antagonismo (Fageria, 2001). Por tal razón un adecuado suministro de calcio a los frutos es esencial para su firmeza, vida de anaquel (Dorais *et al.*, 2001), un aumento de la concentración de calcio pueden reducir la incidencia del rajado de frutos, pudrición apical y otros trastornos fisiológicos que conduce a un deterioro de la calidad de la fruta (Passam *et al.*, 2007). Un suministro relativamente alto de potasio mejora la calidad del fruto de tomate, como la acidez, contenido de sólidos solubles totales, mejora el color, sabor y reduce desordenes en la maduración (Passam *et al.*, 2007). Con base a lo anterior este trabajo tuvo como objetivo estudiar el efecto de la interacción de

K:Ca en el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto de tomate en sistema de cultivo sin suelo.

Objetivo General

Comparar los diferentes niveles de K:Ca en respuesta al crecimiento, rendimiento, nutrición y calidad de fruto de tomate en sistema de cultivo sin suelo.

Objetivos Específicos

- Definir la interacción óptima de K:Ca en la solución nutritiva para el cultivo de tomate en condiciones de hidroponía.
- Cuantificar el efecto de los diferentes niveles de interacción de K:Ca sobre algunas respuestas morfológicas y bioquímicas de la planta.
- Determinar el impacto de la interacción K:Ca en el estatus nutrimental de la planta.

Hipótesis

La interacción entre K:Ca afectará el crecimiento, rendimiento, nutrición y calidad del fruto de tomate en sistema de cultivo sin suelo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Función del potasio en la planta

El potasio es el catión inorgánico más abundante en las plantas que comprende hasta 10% del peso seco de la planta (Broadley *et al.*, 2004; Watanabe *et al.*, 2007). Se concentra en el cultivo de tejidos y órganos reproductivos, reflejando las funciones vitales de K en el metabolismo celular y el crecimiento de extensión. Es un elemento requerido en procesos tales como: síntesis de proteínas, activación enzimática, transporte y translocación de asimilados en la membrana celular, fotosíntesis, neutralización de aniones y regulación del potencial osmótico (Pardo *et al.*, 2006), tolerancia al estrés y para el transporte de fotoasimilados desde los tejidos fuente vía floema a los tejidos de almacén (Pettigrew, 2008; Marschner, 1995). Para un rendimiento óptimo, las concentraciones de K en compartimentos metabólicamente activos, tales como el citosol, el núcleo, el estroma de los cloroplastos y la matriz de la mitocondria, deben mantenerse en alrededor de 100 a 150 mM (Leigh y Wyn Jones, 1984). El potasio también se requiere como un catión para la neutralización de cargas fijas negativas, para el mantenimiento de gradientes de tensión transmembrana, para la homeostasis del pH citoplasmático, y para el transporte de aniones inorgánicos y metabolitos, tanto dentro como fuera de la célula (Leigh y Wyn Jones, 1984; Mengel *et al.*, 2001; Britto y Kronzucker, 2008). La absorción de K por las células de la planta, y su acumulación en las vacuolas, es el principal impulsor de su expansión osmótica, esto se debe a la alta movilidad en la planta (Mengel *et al.*, 2001; Amtmann *et al.*, 2006). La acumulación de K es esencial para el crecimiento del sistema radicular, tanto para la expansión de células en la zona de elongación y para la elongación de las células ciliadas de la raíz (Dolan y Davies, 2004). También es necesario para la expansión de las hojas, elongación de los tubos polínicos hacia óvulos fértiles (Mouline *et al.*, 2002) para la ampliación de frutas y tubérculos. La rápida acumulación y la pérdida de K por células de guarda controlan la apertura y el cierre de las estomas y de ese modo el intercambio de gases y la transpiración (Amtmann y

Blatt, 2009). El K es requerido para la activación de la gran mayoría de las enzimas (más de 60) (Mengel y Kirkby, 2001), esta activación es inducida por cambios conformacionales en la enzima reguladora. El K participa en la activación de algunas enzimas reguladoras como la piruvato kinasa, fosfofructokinasa y ADP-glucosa almidón sintasa. Además, el K⁺ activa la bomba de protones ATPasa de la membrana celular (Anthon y Spanswick, 1986). El K, a diferencia de otros nutrientes no hace parte constitutiva de los principios esenciales (prótidos, lípidos y glúcidos), sino que tiende a permanecer en forma iónica. Debido a la gran movilidad que lo caracteriza actúa básicamente neutralizando ácidos orgánicos que resultan del metabolismo, y así asegurar la constancia de la concentración de H⁺ en los jugos celulares (Navarro y Navarro, 2003).

Función del calcio en la planta

El calcio es un macronutriente esencial en el mantenimiento de la integridad de la membrana celular (Epstein, 1961; Morard *et al.*, 1996) y la permeabilidad de la membrana; mejora la germinación del polen y el crecimiento; activa una serie de enzimas para la mitosis celular, para la división y elongación; posiblemente desintoxica la presencia de metales pesados en los tejidos que afecta a la calidad del fruto, y la salud del tejido conductivo (Jones, 1999). El calcio también está implicado en numerosas funciones celulares que son regulados en las células de las plantas por los cambios en las concentraciones de Ca citosólico, como el equilibrio iónico, la expresión génica, y el metabolismo de hidratos de carbono (Bush, 1995). El contenido de Ca en las plantas superiores, es aproximadamente 0,5% sobre una base de materia seca. En los tejidos vegetales el Ca puede encontrarse en forma libre (Ca⁺⁺) o adsorbido a iones no difusibles como grupos carboxílicos, fosfóricos e hidroxifenólicos; así mismo puede ocurrir en forma de oxalatos, carbonatos y fosfatos de Ca; compuestos que se encuentran con frecuencia en las vacuolas (Mengel y Kirkby, 2001). La señalización del Ca en la planta, una de las funciones muy importantes esto, ocurre porque la inducción de señales se da por estímulos en la planta que

pueden activar canales de Ca en las membranas, incrementando así la entrada de Ca en el citoplasma (Bush, 1995). La entrada de iones de Ca ocasiona un aumento, a su vez genera cascadas de respuesta, por lo cual se le denomina mensajero secundario (Sanders *et al.*, 2002). Según Yang y Poovaiah (2003) las señales recibidas en la membrana son transmitidas por el Ca que hay en el retículo endoplasmático y la vacuola hacia unas proteínas del citoplasma llamadas calmodulinas (CaM) y proteínas dependientes de Ca-kinasas (CDPK). Las CaM siempre están unidas a cuatro iones de Ca, por tanto, la concentración de Ca en el citoplasma determina una mayor o menor acción de las proteínas ante cualquier tipo de señal (Marschner, 1995). Cuando los iones de Ca se ubican sobre la membrana plasmática se inicia la señalización y se activan canales de Ca que permiten la entrada o salida de dicho catión además del potasio y cloro; este tipo de canales también se presentan en las vacuolas, retículo endoplasmático, cloroplasto y núcleo (White y Davenport, 2002; White, 2000; Sanders *et al.*, 2002).

Función del potasio en calidad del tomate

Entre los factores que influyen en la calidad del tomate, el K juega un papel clave en procesos metabólicos y de transporte, balance de carga y generación de presión de turgencia (Dorais *et al.*, 2001). El potasio está relacionado con la mejora de la forma del fruto, la reducción de los trastornos de la maduración, y un aumento en la concentración de ácido de la fruta, lo que mejora el sabor (Adams *et al.*, 1978). Con una nutrición adecuada de K, la fruta es generalmente más alta en sólidos solubles totales, azúcares, ácidos, carotenos, licopeno y tiene una mejor calidad de conservación (Munson, 1985). El desarrollo de color rojo en los frutos de tomate se debe principalmente a la síntesis de los pigmentos carotenoides, y el aumento de K en la solución nutritiva también aumenta la concentración de carotenoides, especialmente licopeno (Trudel y Ozbun, 1971). Un aumento de la concentración de K en la raíz puede aumentar la eficiencia fotosintética de la hoja, posiblemente, mediante el aumento del número de cloroplastos por célula, el número de

células por hoja y por lo tanto del área foliar (Possingham, 1980). López y Satti (1996) observaron una gran disminución en la actividad fotosintética con la disminución del suministro de K en la solución nutritiva. Una concentración inadecuada de K en la solución nutritiva reduce el crecimiento de la planta, tiene un efecto negativo en el cuajado en las plantas jóvenes reproductivas (Besdford y Maw, 1975). Los tomates son uno de los cultivos que requieren, altos niveles de K en la nutrición para lograr la calidad, además de mayores rendimientos (Munson, 1985).

Función del calcio en la calidad del tomate

El calcio es uno de los nutrientes más importantes en la producción de tomate en invernadero ya que tiene funciones importantes en la integridad y la estabilidad de la membrana celular (Paiva *et al.*, 1998b; Marschner, 1995). El movimiento de calcio en la planta se limita en el xilema, causando menos del 2% de calcio total en la planta (Ehret y Ho, 1986). La concentración de calcio en la fruta distal de un racimo tiende a ser menor que en la fruta proximal (Bangerth, 1979; Petersen *et al.*, 1998), lo que indica una mayor probabilidad de trastornos fisiológicos, asociados con Ca, al desarrollarse en distal que la fruta proximal (Dorais *et al.*, 2001). El aumento de los niveles de Ca en la solución nutritiva aumentan los niveles de calcio en la fruta, pero disminuyen el contenido de caroteno y los niveles de licopeno en los frutos de tomate (Paiva *et al.*, 1998b) y afecta negativamente su calidad organoléptica (De Kreij, 1995). La firmeza de la fruta se puede mejorar mediante la pulverización sales de calcio (Cooper y Bangerth, 1976), mientras que la maduración de tomate se puede retrasar mediante el aumento del contenido de calcio en la fruta de 0,11 mg g⁻¹ a 40 mg g⁻¹ de peso fresco (Herencia *et al.*, 1977). El suministro insuficiente de Ca aumenta el número de frutas afectadas por pudrición apical y puede estimular la síntesis de etileno (Bangerth, 1979) y en consecuencia la biosíntesis de carotenoides (Kays, 1991).

Absorción de potasio

La absorción de K a la planta puede ser por difusión y a través del flujo de masa de la solución del suelo (Jungk y Claassen, 1997). En circunstancias en que la capacidad de las raíces para la absorción de K excede la velocidad a la que el K puede ser entregado a la rizósfera, y la adquisición de K por las plantas está determinada por el gradiente de concentración de K entre la solución del suelo de la rizósfera y por el flujo de agua a la raíz. Por lo tanto, los factores que influyen en la adquisición de K por las plantas incluyen la tasa de absorción de K a través de la membrana plasmática de las células de la raíz, lo que reduce la concentración de K en la solución de la rizósfera, la liberación de K no intercambiable por exudados de la raíz, que aumenta la concentración de K y disponibilidad en la solución del suelo, la proliferación de las raíces en el volumen de suelo, lo que aumenta el área y reduce la distancia para la absorción de K y la tasa de transpiración de la planta, que impulsa el flujo de masa de la solución del suelo a la raíz (Jungk y Claassen, 1997; Rengel y Damon, 2008). La absorción de potasio por las raíces y la acumulación por las plantas están determinados por la capacidad de absorción de K de las raíces, la concentración de K en su superficie y la reposición de K en la rizósfera. La relación entre la absorción de K entre la raíz (acumulación de la planta) y la concentración de K en la rizósfera generalmente sigue la tendencia de una hipérbola y una función lineal (Kochian y Lucas, 1988; Leigh y Wyn Jones, 1984; Mengel *et al.*, 2001; Britto y Kronzucker, 2008). La entrada de K en las células de la raíz parece ser catalizada por la H⁺/K symporters, mientras que a concentraciones de K en la rizósfera mayor a 1 mM, la entrada puede estar mediada por los canales de K. Sin embargo, que el K es unidireccional en la entrada y salida a través de la membrana plasmática de las células de la raíz (Jeschke, 1983; White *et al.*, 1991; Britto y Kronzucker, 2008). El K se encarga del equilibrio de otros iones importantes para la nutrición de las plantas y la señalización celular, que es necesario para la homeostasis [K]_{cyt}. La rápida salida de K a partir de las células de la raíz se efectúa por la despolarización de

la membrana plasmática y está mediada por la apertura de KORCs (White, 1997a; Moran, 2007; Amtmann y Blatt, 2009). Los Canales de cationes de tensión insensible (VICCs) también están presentes en la membrana plasmática de las células de la raíz (White, 1997b; Hampton *et al.*, 2005; Demidchik y Maathuis, 2007). Estos canales pueden catalizar tanto la entrada y salida de K de las células de la raíz, no parecen contribuir a la absorción nutricional de K, pero se cree que equilibra eléctricamente otros procesos de transporte, ya que también catalizan la entrada de Ca, para contribuir a la homeostasis de Ca en el citosol y la señalización (White y Broadley, 2003; Hampton *et al.*, 2005; Demidchik y Maathuis, 2007).

Transporte de potasio dentro de la planta

Después de la absorción por las células epidérmicas y corticales, el K es transportado vía simplasto a través de la raíz a través de los plasmodesmos a las células de parénquima, donde se carga en el xilema (Kochian y Lucas, 1988). Se puede estimar que más del 90% de K que entra en el xilema es a través de ruta simplasto. El voltaje a través del límite simplasto/xilema es de aproximadamente de 80 mV (De Boer y Volkov, 2003), que permite a KORCs para cargar el xilema con concentraciones de K hasta aproximadamente 4 mM. Cargando el xilema con concentraciones de K superior a través de KORCs requiere una despolarización sustancial de las células de parénquima. La concentración de K en el xilema varía entre 2 a 25 mM, dependiendo de una variedad de factores (Marschner *et al.*, 1997). En el xilema la concentración de K aumenta con el incremento de la concentración de K en la rizósfera (Armstrong y Kirby, 1979; Blanco 1997b; Peuke *et al.*, 2002). Un mayor flujo de agua a través del xilema reduce la concentración de K en la savia, por lo general aumenta la absorción de K por las raíces. La entrega de K dentro de la sesión a través del xilema está determinada en gran parte por la transpiración. Los vasos más grandes están diseñados para el movimiento rápido hacia adelante de la savia, mientras que los vasos más pequeños son importantes para la transferencia de soluto entre el xilema y los tejidos circundantes. La

concentración de K apoplástico en el punto de descarga del xilema se aproxima a 5.20 mM, lo que permite a K para entrar en el simplasto y ser transportados a través KIRCs y VICCs en la membrana plasmática de las células de la vaina del haz de las venas más pequeñas (Keunecke *et al.*, 2001). Con la excepción de células de guarda, que ajustan su concentración de K para regular la apertura y cierre estomático (Leigh y Storey, 1993; Fricke *et al.*, 1994). El potasio se redistribuye a partir de hojas maduras a los tejidos en desarrollo a través del floema. Mientras que el xilema es responsable del transporte unidireccional, el floema es esencial para el transporte de asimilados desde la fuente a los sitios de mayor demanda. Los fotosintatos tales como azúcares y aminoácidos son transportados a través del floema hacia el desarrollo de flores, frutas en maduración, semillas y raíces. La concentración de K en el floema tiende a ser significativamente mayor que en el xilema y probablemente van desde alrededor del 50 a 150 mM (Kallarackal *et al.*, 2012). Así como en el xilema y floema el K es indispensable, esto puede ser simplemente una cuestión de equilibrio de carga. La savia del floema puede contener ácidos orgánicos y grandes cantidades de aminoácidos con carga negativa (Hayashi y Chino, 1990). Otros informes sugieren que la translocación de azúcares a través del floema requiere K debido a la carga de sacarosa. En la fuente, la carga de sacarosa en el floema es en gran parte a través de transportadores de H⁺-coupled sacarosa. La entrada de H⁺ podría conducir la despolarización de la célula en el floema, reduciendo así la fuerza impulsora para la carga de sacarosa (Ahmad y Maathuis, 2014).

Absorción de calcio

El calcio se adquiere a partir de la solución del suelo en forma de Ca²⁺. La absorción de Ca hacia la raíz está vinculada al flujo de masa de agua, más que la mayoría de otros iones (Barber, 1995) que representa la acumulación de Ca en la superficie de la raíz (Barber y Ozanne, 1970). Los residuos una vez en el apoplasto de la raíz (esencialmente el espacio de la pared celular), el Ca se une a elementos cargados negativamente dentro del espacio libre de Donnan o

sobre las membranas. El Ca es absorbido por las células bajo un gradiente electroquímico o pasan a través del espacio libre de agua de la pared celular por vía xilema en el que se transfieren a la célula (White y Broadley, 2003). La presencia de la banda de Caspari suberizada en las paredes radiales y transversales de las endodermis puede formar una barrera parcial al movimiento radial de Ca (y agua) para el xilema a través del apoplasto (Clarkson, 1984; Schreiber *et al.*, 2005; Baxter *et al.*, 2009). Cuando esta barrera es eficaz, el Ca debe atravesar las membranas celulares y deben abordarse en el citoplasma al menos hasta que se haya pasado la banda de Caspari. Sin embargo, parece que hay grandes diferencias entre las especies de plantas en el grado en que el agua y Ca pueden eludir la endodermis y fluir continuamente a través de la raíz al xilema exclusivamente a través de la vía apoplastica, y por lo tanto se utiliza la vía simplastica (por células a célula, a través de membranas o plasmodesmos) (White 2001; Cholewa y Peterson, 2004; Bramley *et al.*, 2009, 2010). La evidencia experimental, utilizando trazadores radiactivos y los inhibidores de transporte, implica un papel sustancial para Ca-ATPasas de transporte desde el suelo hasta el xilema de la raíz (Baxter *et al.*, 2009). Una estrategia adecuada para aumentar la acumulación total de Ca en el tejido puede ser la disminución de la resistencia al flujo vía apoplasto de Ca a través de las raíces en el xilema y reducir la necesidad de la vía simplasto (Faiyue *et al.*, 2010), al menos en suelos donde este ion es prevalente. Los órganos que son predominantemente alimentados vía xilema tienen altas tasas de transpiración y alta [Ca], por lo contrario los órganos que son alimentados vía floema tienen bajas tasas de transpiración y una baja [Ca] (White y Broadley, 2003; Conn y Gilliam, 2010).

Transporte del Calcio dentro de la planta

El calcio es transportado en el xilema, ya sea como Ca o acompañado con ácidos orgánicos. La concentración de Ca en la rizósfera tiene un efecto significativo en la concentración de Ca en la savia del xilema, que puede ser más de 20 mM de entrega. El Ca se distribuye diferencialmente,

intracelularmente y la concentración de Ca libre ([Ca]) está estrechamente controlada (White y Broadley, 2003). La Compartimentación de calcio en diferentes orgánulos subcelulares es importante en la prevención de reacciones de precipitación de Ca con especies de fósforo inorgánico (Pi), ATP y otros fosfatos orgánicos, de competencia para los sitios de unión de la enzima preferiblemente reservados para Mg y permitir que la efectivo uso de Ca como un segundo mensajero en el citosol durante la señalización (Marschner, 1995). Por ejemplo, la [Ca] citosólico es por lo general cerca de 100 nM cuando la célula está inactiva pero, puede ser por encima de 1 mM durante los eventos de señalización. Sin embargo, las elevaciones de [Ca] en el citosol generalmente no son prolongados y en su lugar oscilan con el fin de mantener la viabilidad celular (McAinsh y Pittman, 2009). En contraste, la [Ca] en la vacuola es por lo general en exceso de 1 mM (Fricke *et al.*, 1994) y otros compartimentos intracelulares tales como el retículo endoplásmico (ER), también en la mitocondria y cloroplasto puede haber elevadas [Ca] en comparación con el citosol (Subbaiah *et al.*, 1988; Sai y Johnson, 2002; Logan y Knight, 2003; McAinsh y Pittman, 2009). El Ca no se puede ser removilizado fácilmente una vez que es descargado del xilema y en particular en los puntos de baja transpiración (White y Broadley, 2003; Conn y Gilliam, 2010). Esto da lugar a órganos altamente transcurridos como hojas con alta [Ca] y aquellos con baja transpiración (como fruta) con baja [Ca] (White y Broadley 2003). Las características del transporte en el tonoplasto, en particular, parecen jugar un papel clave en la capacidad de almacenamiento, flujo de Ca y agua a través de la membrana plasmática (PM) (Karley *et al.*, 2000a; MacRobbie, 2006; Conn y Gilliam, 2010). Además, el papel de suministro de Ca y el movimiento del agua a través del apoplasto también es probable que incida sobre la distribución de Ca (Karley *et al.*, 2000b; Kerton *et al.*, 2009).

Antagonismo entre potasio y calcio

En lo que se refiere a sus efectos fisiológicos, el Ca es generalmente considerado como el equivalente al potasio. La movilidad de los iones de Ca se

ve afectada por las altas concentraciones de iones de K, no sólo en el suelo, sino también en las propias plantas, en las que influyen en la distribución de calcio y por lo tanto puede provocar deficiencias (Bould y Tsai-fua, 1976; Shear, 1975). Los altos niveles de potasio en el medio ambiente de la raíz interfieren con la absorción de calcio (Voogt., 1998; Nukaya *et al*, 1995; Bar-Tal y Pressman, 1996). Por otro lado, el exceso de Ca en el suelo puede inhibir la absorción de K debido a la competencia entre los dos iones (Paiva *et al.*, 1998). Sin embargo, cantidades óptimas de calcio puede resultar en un aumento en la disponibilidad de intercambiable y soluble en agua de potasio (Ananthanarayama y Hanumantharaju, 1992).

Antagonismo entre potasio y magnesio

El efecto antagonista de un aumento de los niveles de Mg en la absorción de K podría atribuirse a diferencias en la movilidad iónica (Ananthanarayama y Hanumantharaju, 1992). Las altas concentraciones de K en la solución de nutrientes pueden resultar en deficiencias de Mg en el tejido de la planta (Jones, 1999) y también puede suceder lo contrario. Las altas concentraciones de Mg ya sea en el suelo o dentro de la planta son a menudo una causa de mal estado para la absorción de K (Kirkby y Mengel, 1976). Aunque altos niveles de K en la solución nutritiva afecta la absorción de Mg, el aumento de la oferta de K afecta el contenido de Mg de los diferentes órganos de la planta en un grado variable (Grimme *et al.*, 1974). La relación K:Mg en el suelo parece ser importante porque las concentraciones excesivas de alguno de los elementos pueden afectar negativamente el crecimiento de las plantas (Bergmann, 1992).

Antagonismo entre calcio y magnesio

El efecto antagónico entre Ca y Mg es bien conocido; la tasa de absorción de Mg puede ser presionado por Ca y viceversa (Paiva *et al*, 1998; Hao y Papadopoulos, 2003). El calcio es fuertemente competitivo con Mg, y los sitios de unión en la membrana plasmática de la raíz parecen tener menos afinidad por el Mg altamente hidratado que para Ca (Marschner, 1986). Los niveles

elevados de Ca externo resulta una disminución de la absorción de Mg debido al antagonismo catiónico o interacciones. Las disminuciones de Mg también se podrían atribuir a la retirada de Mg de la solución de nutrientes con el fin de mantener el equilibrio entre cationes contra el aumento de Ca (Carvajal *et al.*, 1999). Los síntomas de deficiencia de magnesio puede ser, hasta cierto punto, por una alta relación Ca: Mg, además del contenido de Mg absoluto en las hojas (Bergmann, 1992). El calcio también se informó con frecuencia como un inhibidor de enzimas que requieren Mg. Además; una alta actividad de Ca contrarresta la función de Mg (Clarkson y Sanderson, 1978). Según Ananthanarayama y Hanumantharaju (1992) el Mg ejerce un efecto más depresivo sobre la absorción de Ca. Grattan y Grieve (1999) reportaron que las concentraciones excesivas de Ca en hoja podrían interferir con la fijación de CO₂ por la inhibición de las enzimas del estroma, en particular aquellos que son activados por el Mg.

Antagonismo entre potasio calcio y magnesio

En los procesos de absorción de, K, Ca y Mg son fuertemente antagónicos (Voogt, 1998) lo que resulta en una deficiencia de alguno de estos nutrientes. Una deficiencia de un elemento en la planta, podría implicar un exceso relativo o absoluto por una aplicación desequilibrada de un catión (Bergmann, 1992). Una concentración de Ca suficiente en la solución nutritiva es importante, pero con frecuencia grandes cantidades de un catión interfiere con la absorción de Ca (Barber, 1995). El magnesio puede modificar fuertemente la absorción de Ca y K, mientras que K y Ca pueden restringir la absorción y translocación de Mg desde las raíces a las partes de las plantas superiores (Schimanski, 1981). Según Bergmann (1992), alta concentración de K causa daños indirectos mediante la inducción de deficiencias de Ca y Mg.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en 2014 y 2015 en un invernadero del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila. Con temperatura promedio de 17.6 °C (promedio mínima de 11.2 °C y promedio máxima de 29.9 °C), y una humedad relativa promedio de 77% (promedio mínima de 40% y promedio máxima de 95%). La radiación fotosintéticamente activa incidente diurna fue en promedio de 306 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Se utilizaron semillas de tomate tipo bola cv. Clermon, fueron sembradas el 11 julio, en charolas de 200 cavidades con turba ácida y trasplantadas el 21 de agosto en contenedores de polietileno negro de 36 por 39 cm, con capacidad de 12 L. Los contenedores se llenaron con turba ácida y perlita (70%:30%v/v). La unidad experimental consistió con una planta, las cuales se trasplantaron a 40 cm entre plantas y 120 cm entre hileras, obteniendo un total de 72 plantas. Para la formulación de la solución nutritiva (SN) se consideraron las propiedades químicas del agua de riego; SO_4^{--} , Mg^{++} y Ca^{++} (5.9, 3.9 y 4.2 meq L^{-1} respectivamente). Los tratamientos evaluados fueron 12 relaciones de K:Ca (Cuadro1). El pH de las soluciones se ajustó a 6.0 ± 0.1 con HNO_3 y H_3PO_4 y la conductividad eléctrica varió entre 2.0 a 3.0 dS m^{-1} .

Los riegos se efectuaron mediante un sistema de riego por goteo con gasto de 4 l h^{-1} , según las necesidades hídricas de las plantas se aplicó un volumen suficiente para para mantener una fracción de lixiviado de 25 % del total del riego. La cosecha se inició a los 83 días después del trasplante (ddt). La obtención del rendimiento total fue mediante la suma del peso de los diez racimos cosechados en 77 días. Se tomaron las plantas de cada contendor y se lavó la raíz con agua potable para eliminar el exceso de sustrato; posteriormente se separó en raíz, tallo y hojas. Los órganos separados se introdujeron a una estufa de secado por 72 h a 65 °C. La determinación de la materia seca total fue obtenida a partir de la suma del peso de los diferentes órganos.

Cuadro 1. Concentración de macronutrientos de las soluciones nutritivas estudiadas obtenida de la relación K:Ca.

Tratamiento	Factor A			Factor B		
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺
	meq L ⁻¹					
T1	14	2	4	7	4	9
T2	14	2	6	7	4	11
T3	14	2	8	7	4	13
T4	14	2	6	9	4	9
T5	14	2	8	9	4	11
T6	14	2	10	9	4	13
T7	14	2	8	11	4	9
T8	14	2	10	11	4	11
T9	14	2	12	11	4	13
T10	14	2	10	13	4	9
T11	14	2	12	13	4	11
T12	14	2	14	13	4	13

La determinación de azúcares totales se realizó por el método descrito por Whitam *et al.* (1971), se pesó 1 g del fruto de tomate, agregando 50 ml de etanol al 80%, colocándose en una parrilla hasta ebullición por 5 minutos, después se refrigeró a 5 ° C hasta su evaluación. Se tomó 1 ml de la solución alcohólica y se llevó a evaporación. Al residuo se le añadieron 20 ml de agua destilada se agito y se tomó 1 ml de la solución, el cual se transfirió en un tubo falcón se adicionaron 2 ml de agua destilada, posteriormente se agregó 6 ml del reactivo antrona (0.4 g de antrona + 100 ml de ácido sulfúrico) la aplicación del reactivo antrona se realizó en baño de hielo. Después, la mezcla de reacción se colocó a ebullición durante 5 minutos, para posteriormente enfriarlo en baño de hielo y colocar 3 ml de muestra en una celda de cuarzo para tomar la lectura en un espectrofotómetro a 600 nm. La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración de glucosa y se expresó en mg g⁻¹ de peso fresco.

Los azúcares reductores se determinaron por colorimetría mediante el método Nelson-Somogyi como lo indican Camacho *et al.* (1999), mediante la misma solución alcohólica al 80 % de azucares totales, mediante un tubo de ensayo se tomó 0.1 ml, se ajustó a 1 ml con agua destilada, se agregó 1 ml del reactivo de

Nelson, se agitó y luego se colocó a baño maría a 60 °C por 20 minutos cubriendo las muestras con papel aluminio durante 20 minutos. Se agregó 1 ml del reactivo de arsenomolibdato y finalmente 7 ml de agua destilada, se tomó 3 ml de la muestra en una celda de cuarzo para medirlo en un espectrofotómetro a una absorbancia de 540 nm. La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración de glucosa y se expresó en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso fresco.

Para la determinación del contenido de almidón se tomó el residuo del fruto de la extracción alcohólica de azúcares, se añadieron 30 ml de agua destilada, se mantuvo a ebullición por 20 minutos, se le agregaron 10 ml de diastasa al 1% como indica Rodríguez y Ortega, (1976), se colocó a baño maría a 55 °C por 1.5 horas. Se filtró y se tomó una alícuota de 10 ml, se le agregó 5 ml de HCl al 1.125 N y nuevamente se colocó a baño María a 55 °C por 2.5 horas, se ajustó el pH a 8 con NaOH al 50%. Los azúcares solubles, reductores y totales liberados se cuantificaron por el método propuesto por Witham *et al.* (1971). Se tomó 1 ml de la muestra en tubos de ensayo, se ajustó a 3 ml con agua destilada, se agregó 6 ml del reactivo antrona, se agitó y se puso a baño maría, hasta ebullición por 3 minutos, enfriar y colocar 3 ml de muestra en una celda de cuarzo para medirlo en un espectrofotómetro a una absorbancia de 600 nm. La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración de antrona-diastasa el valor se expresó en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso fresco.

Los carotenoides totales fueron cuantificados por la metodología descrita por Campos (1985). Se tomó 1 g de la pulpa y cascara de tomate, se homogenizó con 15 ml de acetona fría. La acetona se filtró para eliminar residuos, el filtrado se colocó en un embudo de separación de 500 ml, se agregaron 20 ml de hexano y 100 ml de agua destilada se agitaron y se dejó reposar para separar dos fases, la superior contenía los carotenos en hexano, la parte inferior acetona y agua, el proceso se repitió con la parte inferior hasta quedar incolora. Los extractos de carotenoides se lavaron tres veces con 100 ml de agua para eliminar la acetona, las grasas se saponificaron con 5 ml de hidróxido de sodio (10.0 N), y se lavó con agua destilada para eliminar la base. Finalmente se filtró

con una capa de sulfato de sodio para eliminar el agua. Al extracto final se registró su absorbancia a 452 nm en un espectrofotómetro. La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración de β -caroteno y se expresó como mg g^{-1} de peso fresco.

La determinación de licopeno se realizó mediante la técnica descrita por Fish *et al* (2002), se tomó 1 g de tomate, se homogenizó con 5 ml de buffer fosfato pH 7, de la mezcla resultante se tomó 2 ml el cual se colocó en un tubo de centrifugación agregando 4 ml de la mezcla hexano/acetona (3:2 en volumen). Se centrifugó (HERMLE[®]Z 326 K) a 2500 rpm por 10 minutos, se colocó el sobrenadante en una celda de cuarzo para medir la absorbancia en un espectrofotómetro a 502 nm.

Las variables anteriores se midieron con un espectrofotómetro Hach[®]DR 5000.

Se determinó la concentración de los macronutrientes en raíz, parte aérea y en frutos. Los tejidos se digitaron en una mezcla de 2:1 de H_2SO_4 : HClO_4 y 2 ml de H_2O_2 al 30% y las muestras digeridas fueron determinadas para nitrógeno mediante el procedimiento de Micro-Kjeldahl (Bremner, 1996), mientras que para P, K, Ca y Mg se realizó con espectrómetro de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES, model Liberty, VARIAN, Santa Clara, CA) (Soltanpour *et al.*, 1996).

La determinación de los parámetros L, a y b que indican el color del fruto se realizó con un colorímetro Minolta[®] CR-300, se midió un fruto del sexto racimo de cada repetición, se tomaron cuatro lecturas (superior, inferior y dos lecturas en la parte ecuatorial) y se promediaron. La firmeza se determinó con un penetrometro McCormick[®]FT 327 utilizando una puntilla de 8 mm de diámetro. La altura se midió desde la base del tallo hasta la parte apical de la planta. El experimento finalizó a los 160 ddt; El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con un arreglo factorial 4x3, con seis repeticiones por cada tratamiento. Los datos obtenidos se sometieron en un análisis de varianza y la comparación de medias fue de acuerdo a la prueba de Duncan ($\alpha \leq 0.05$) utilizando el programa Statistical Analysis Systems (SAS) versión 9.2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los azúcares totales, azúcares reductores, almidón, licopeno, y carotenoides totales fueron afectados por las concentraciones de K y Ca en la SN (Cuadro 2), la interacción de estos factores también influyeron en estas variables (Cuadro 2). Los azúcares totales en el fruto de tomate aumenta con el incremento de la concentración de K y con la disminución de Ca en la SN (Figura 1A). Este mismo efecto se presenta para azucares reductores (Figura 1B) y almidón (Figura 2). Resultados similares fueron reportados por Almeselmani *et al*, (2009) quienes observaron un aumento en el contenido de azucares reductores al elevar el K de 200 a 300 mg L⁻¹ y un incremento en los sólidos solubles totales al aumentar a 400 mg L⁻¹. Sin embargo, una aplicación elevada de Ca disminuye el contenido de estas variables, este efecto probablemente es debido a una relación elevada sobre Mg y K lo cual provoca una disminución en la absorción de estos cationes (Larcher, 2003), ya que el Mg es la parte central de la molécula de la clorofila el cual afecta la actividad fotosintética y como consecuencia la producción de carbohidratos (Mengel y Kirkby, 2000), mientras que el K es esencial para muchos procesos de la fotosíntesis, interviene en la translocación de fotosintatos en órganos de mayor demanda, mantiene la turgencia y la activación de las enzimas (Marschner, 1995; Mengel y Kirkby, 2001). Estas funciones proporcionan un mejor transporte y producción de carbohidratos para los sitios de mayor demanda.

El contenido de licopeno en el fruto aumenta con 9 meq L⁻¹ de Ca y 11 meq L⁻¹ de K, superiores a estas concentraciones decrece el contenido de este (Figura 3A). La concentración de carotenoides totales en el fruto es mayor con 7 meq L⁻¹ de K y 13 meq L⁻¹ de Ca, el aumento de la concentración de K (9, 11 y 13 meq L⁻¹ respectivamente) y la disminución de Ca (9 y 11 meq L⁻¹) en la SN decrece la concentración de los carotenoides totales (Figura 3B). Al aumentar el K se obtuvo mayor concentración de licopeno y mejor uniformidad en el color rojo

intenso del fruto como fue reportado por Almeselmani *et al*, (2009) quienes observaron un aumento lineal en el contenido de licopeno al aumentar el K de 200 a 400 mg L⁻¹. El efecto del K en contenido de carotenoides, es probablemente por estimulación de enzimas específicas que participan en la biosíntesis de DOXP (1-desoxi-D-xilulosa 5-fosfato) una vía directamente implicada en la regulación general de la formación de licopeno en fruto de tomate (Bramley, 2002). Fanasca *et al*, (2006) señala que el K desempeña un papel especial en el proceso de biosíntesis de carotenoides, mediante la activación de varias de las enzimas que regulan el metabolismo de los carbohidratos (piruvato quinasa y la fosfofructoquinasa), así como en los precursores de isopentenyl difosfato (piruvato y gliceraldehído 3-fosfato) para la biosíntesis de licopeno. Al elevar Ca en la SN provoca una disminución en el contenido de licopeno pero, aumenta el contenido de carotenoides totales en el fruto, esto puede ser debido a que las concentraciones altas de Ca provocó una maduración desuniforme y coloración rojo bajo en el fruto como se observó en este trabajo lo cual se relaciona a una mayor concentración de carotenoides totales (Giuliano *et al*, 1993). También puede ser una posible antagonismo entre estos nutrimentos (K y Ca), pues Paiva *et al* (1998) indican que el aumento en la concentración de Ca en la SN provocó una disminución en el contenido de licopeno debido al antagonismo entre Ca y K, o la posible influencia del Ca en la inhibición de la biosíntesis de etileno lo cual tiene como consecuencia alteraciones en la coloración del fruto.

Cuadro 2. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de azúcares totales, azúcares reductores, almidón, licopeno y carotenoides totales en los frutos de tomate cv. Clermon.

(meq L ⁻¹)		Azúcares totales (mg g ⁻¹ P.F)	Azúcares reductores (mg g ⁻¹ P.F)	Almidón (mg g ⁻¹ P.F)	Licopeno (µg g ⁻¹ P.F)	Carotenoides totales (µg g ⁻¹ P.F)
K	7	21.91c	41.91d	3.59c	17.24c	191.74a
	9	26.66b	58.58c	8.09b	21.12b	160.65b
	11	31.90a	77.36b	7.91b	25.76a	152.85b
	13	30.33a	80.75a	8.51a	20.76b	181.54a
Ca	9	30.60a	68.37a	7.61a	23.10a	165.90b
	11	27.66b	69.79a	7.23b	21.83b	161.58b
	13	24.85c	55.79b	6.23c	18.74c	187.60a
Anova						
K	P	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001
Ca	P	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001
Interacción		≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001
CV (%)		5.13	3.60	2.73	4.15	4.88

P ≤ ns, 0.05, 0.001 = no significativo y significativo; Interacción = K x Ca; CV = coeficiente de variación; Las letras a, b y c son las categorías obtenidas de la comparación de media con Duncan ($\alpha \leq 0.05$).

Figura 1. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de azúcares totales y azúcares reductores en frutos de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.

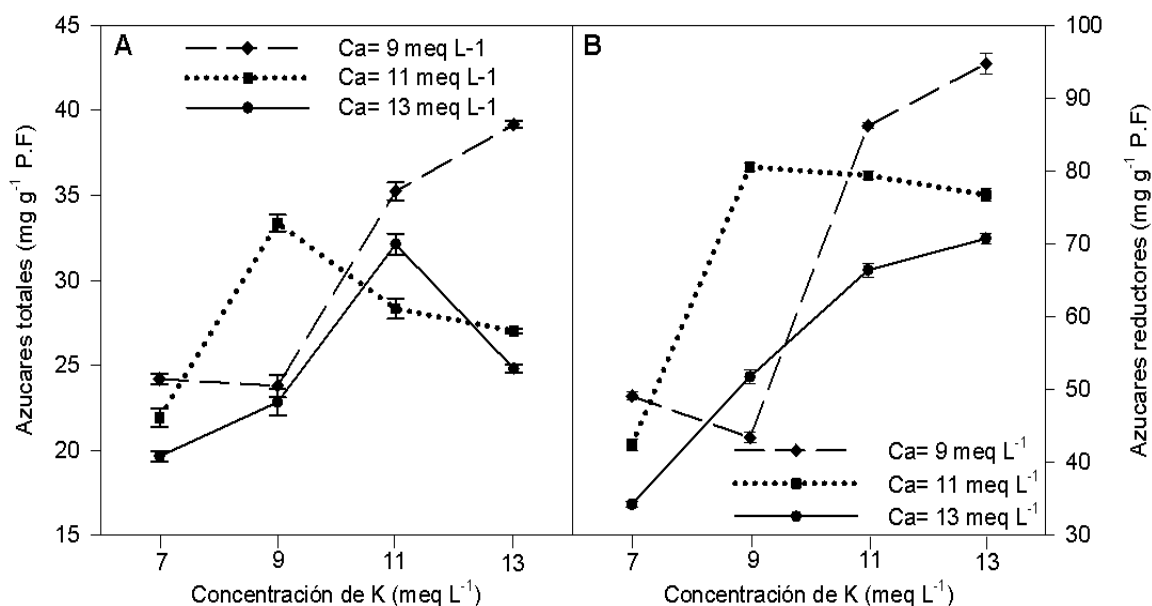


Figura 2. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de almidón de los frutos de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.

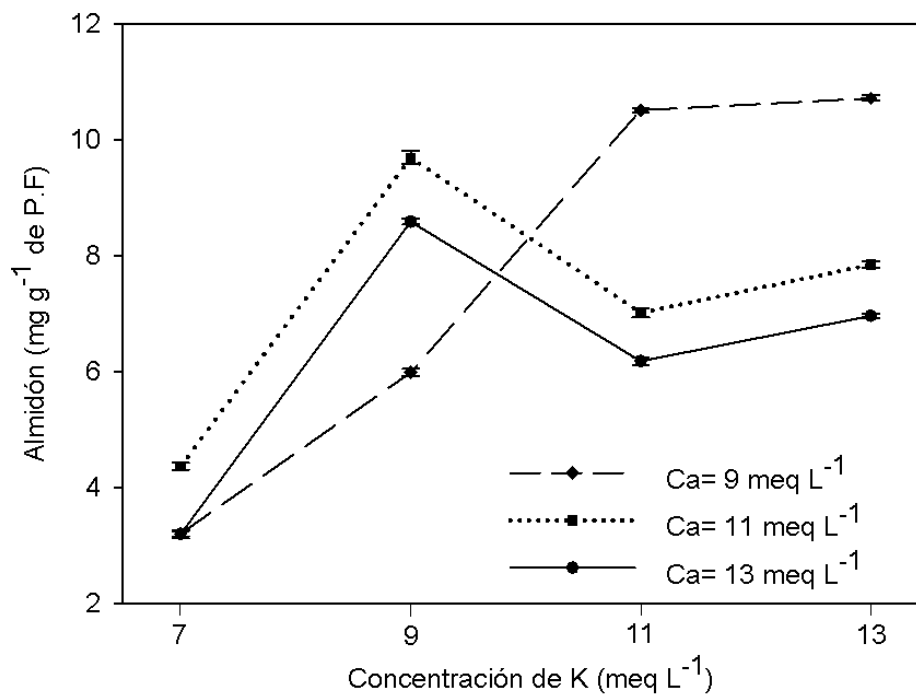
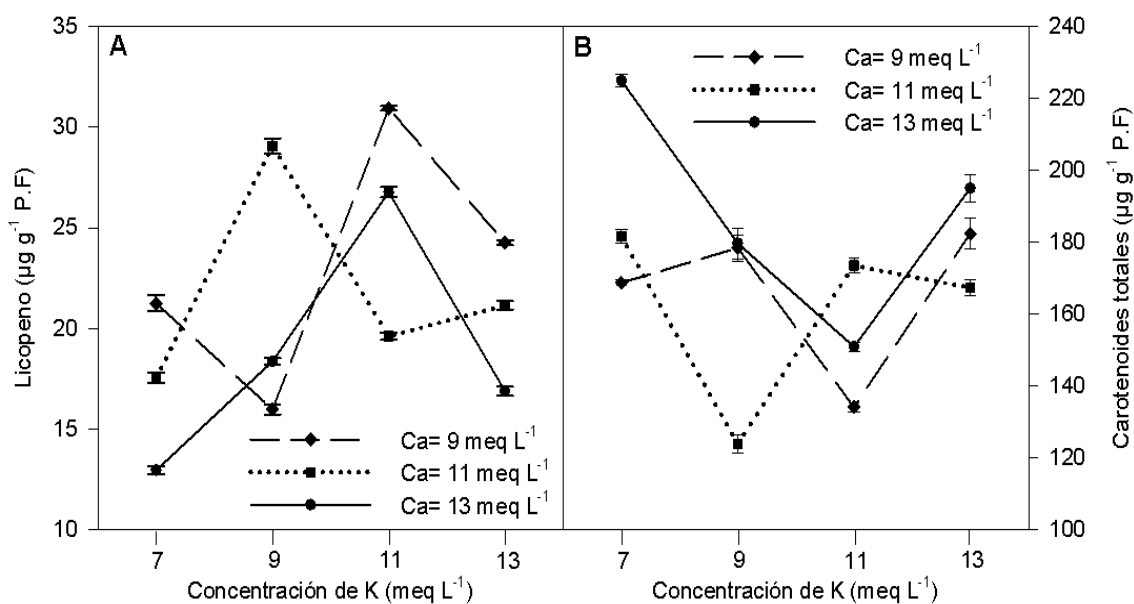


Figura 3. Efecto de la interacción K:Ca en el contenido de licopeno y carotenoides totales en frutos de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.



El rendimiento, biomasa total, altura de planta y firmeza fueron afectados por la concentración de K y Ca en las soluciones nutritivas (Cuadro 3), mientras que el color del fruto solo fue afectado por la concentración de Ca (Cuadro 3). La interacción entre K y Ca influyeron en estos parámetros (Cuadro 3). El rendimiento por planta aumenta al incrementar la concentración de K a 9 meq L^{-1} y con 11 meq L^{-1} de Ca, una concentración mayor a estos nutrientes el rendimiento disminuye (Figura 4A), este mismo comportamiento se presenta para el peso seco total (Figura 4B) y altura de planta (Figura 5). El rendimiento, peso seco total y altura de planta aumenta con el incremento de la concentración de Ca pero al elevar K ($>9 \text{ meq L}^{-1}$) se observa una disminución de estos parámetros. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Rubio *et al*, (2010) quienes indican que el aumento de K a 14 mmol L^{-1} el rendimiento y la biomasa disminuye en plantas de pimiento. Asimismo, estas variables registran su mayor valor con una proporción de K/Ca igual a $9/11 \text{ meq L}^{-1}$, esto indica una interacción positiva entre estos dos cationes pudiendo mejorar sus funciones en las plantas principalmente en la actividad fotosintética. De acuerdo con Cakmak (2005) y Pettigrew (2008) reportan que el K hace más eficiente la actividad fotosintética, la translocación de fotoasimilados y compuestos orgánicos hacia órganos reproductivos a través del floema, mientras que Ca participa en la fotosíntesis, en el metabolismo de lípidos, proteínas, hidratos de carbono, mejorando el crecimiento y división celular (White, 2003). Por lo tanto, una proporción óptima resulta en un mayor crecimiento y desarrollo de la planta lo que conduce a un mayor rendimiento y producción de biomasa como lo obtenido en esta investigación.

La firmeza del fruto aumenta conforme se incrementa la concentración de Ca en la SN pero, cuando la concentración de K es superior a 11 meq L^{-1} este disminuye (Figura 6). Al aumentar el Ca la firmeza del fruto es mayor, esto puede deberse a que el Ca mejora la estabilidad estructural e integridad de la membrana celular mediante la conexión de varias proteínas y fosfolípidos en la superficie, así como en la formación de Pectatos de calcio para proporcionar estabilidad y resistencia mecánica a las paredes celulares (Cakmak, 2014).

El color rojo (a^*) de los frutos es mayor al aumentar el K a 11 meq L⁻¹ con 9 meq L⁻¹ de Ca, no obstante, al aumentar estos nutrientes en la SN decrece el color (Figura 7). Esto se debe a que al aumentar el K en la SN aumento el contenido de licopeno como se obtuvo en esta investigación, lo cual se relaciona a un color rojo más intenso en el fruto (Giuliano *et al.*, 1993), ya que el K activa enzimas que son precursoras para la formación de carotenoides dando origen a la formación de licopeno (Fanasca *et al.*, 2006).

Cuadro 3. Efecto de la interacción K:Ca en el rendimiento, peso seco total, firmeza, altura y color en frutos de tomate cv. Clermon.

(meq L ⁻¹)		Rendimiento (kg planta ⁻¹)	P.S. Total (g planta ⁻¹)	Altura (cm)	Firmeza (kg cm ²)	Parámetros de color		
						L*	a*	b*
K	7	6.56d	442.10c	220.44c	1.87b	47.09	12.55	22.88
	9	7.08b	452.79a	232.14a	2.29a	47.52	12.93	23.24
	11	7.19a	446.88b	226.66b	2.42a	46.68	13.81	22.30
	13	6.84c	444.35bc	225.96b	1.94b	46.28	13.86	22.93
Ca	9	6.96a	443.65b	223.02b	1.84c	46.58	14.57a	23.16
	11	6.98a	449.95a	230.30a	2.06b	46.70	13.49ab	22.42
	13	6.82b	445.99b	225.58b	2.49a	47.39	11.79b	22.93
Anova								
K	P	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001	ns	ns	ns
Ca	P	≤0.002	≤0.003	≤0.003	≤0.001	ns	≤0.01	ns
Interacción		≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.003	ns	≤0.03	ns
CV (%)		1.55	0.7	1.64	8.1	2.35	15.46	6.22

P ≤ ns, 0.05, 0.001 = no significativo y significativo; Interacción = K x Ca; CV = coeficiente de variación; L* = luminosidad; a* = cromaticidad c* = Matiz; Las letras a, b y c son las categorías obtenidas de la comparación de media con Duncan ($\alpha = 0.05$).

Figura 4. Efecto de la interacción K:Ca en el rendimiento y peso seco total de plantas de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.

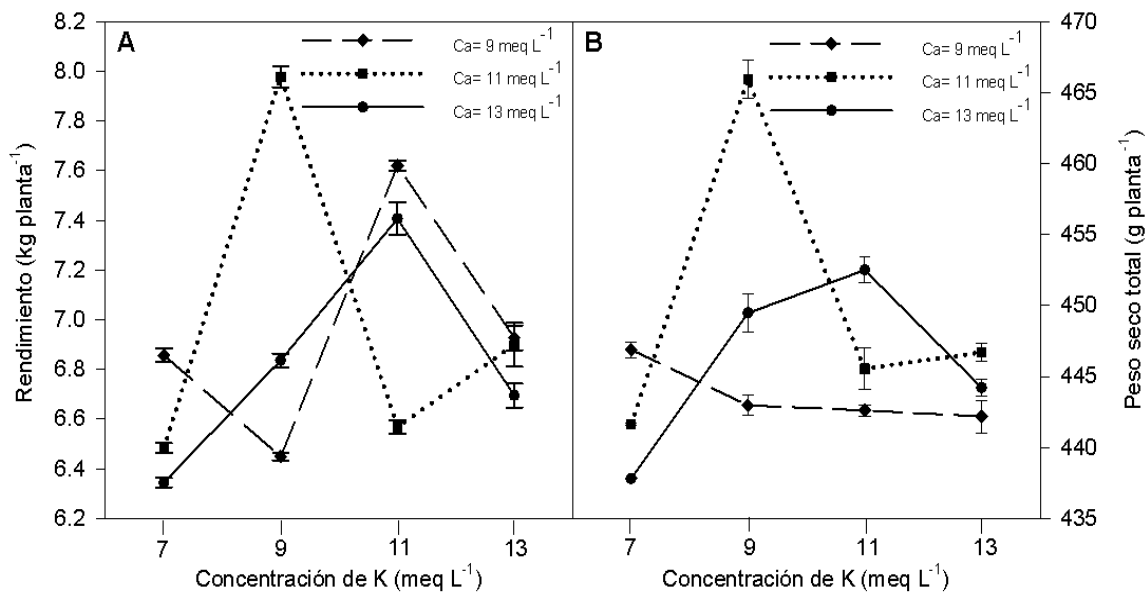


Figura 5. Efecto de la interacción K:Ca en la altura de la planta de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.

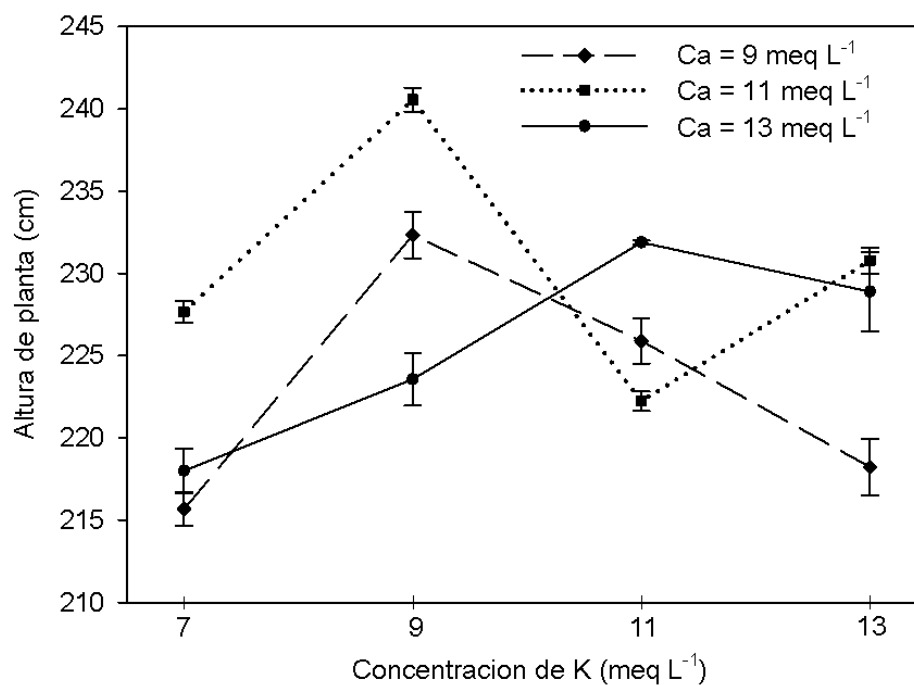


Figura 6. Efecto de la interacción K:Ca en la firmeza del fruto de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.

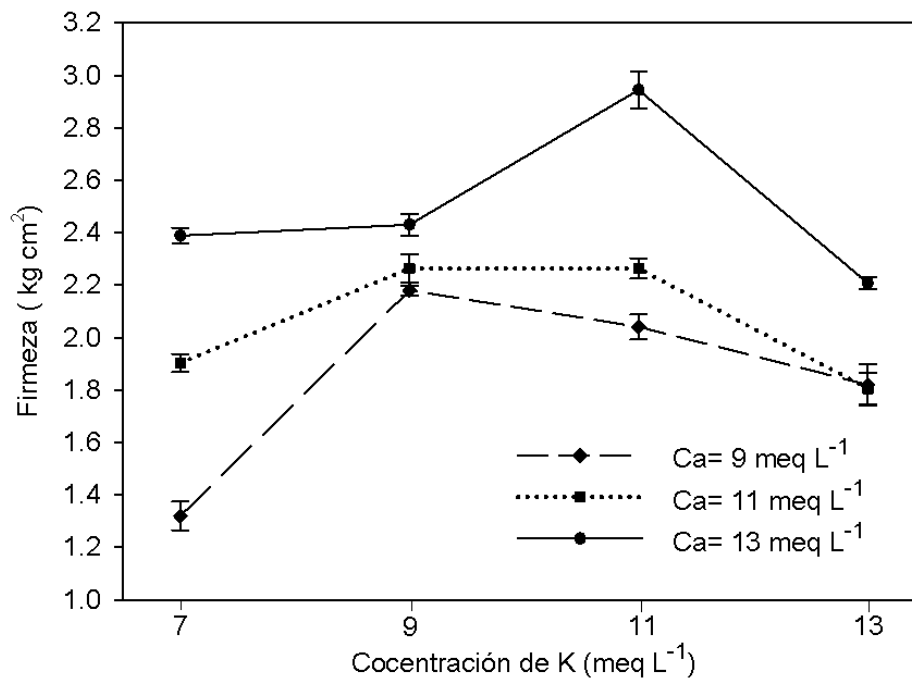
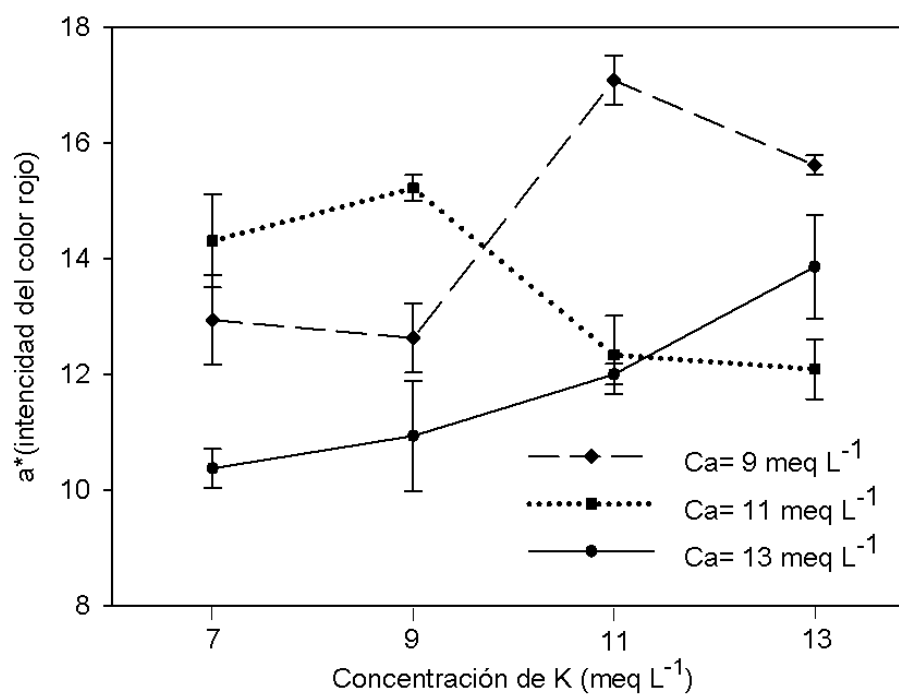


Figura 7. Efecto de la interacción K:Ca en el color del fruto de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.



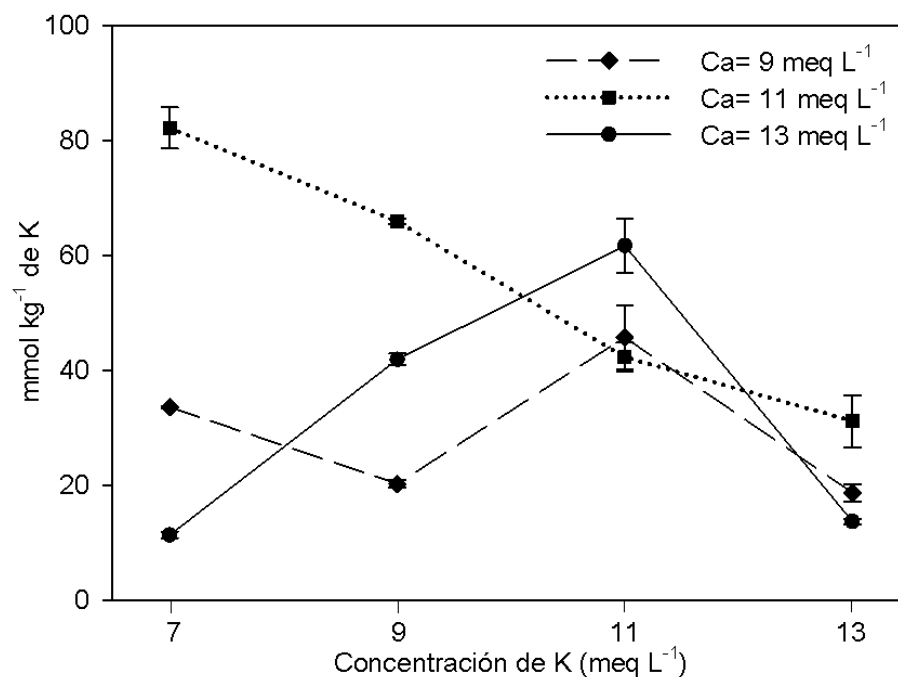
La concentración de fósforo (P) y K en la raíz fueron afectados por las concentraciones de K y Ca en la SN (Cuadro 4), mientras que la concentración de Ca en el tejido fue afectado por la concentración de la misma en la SN, para N no fue afectada por estos factores (Cuadro 4), la interacción de ambos factores influyó en la concentración de K en este órgano (Cuadro 4). La concentración de K en el tejido disminuye al incrementar la concentración de la misma con 11 meq L⁻¹ de Ca en la SN, sin embargo, en menor proporción, una mayor concentración de Ca (13 meq L⁻¹) y con el aumento de la concentración de K hasta 11 meq L⁻¹ incrementa la concentración de este nutriente (Figura 8).

Cuadro 4. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de macronutrientes en raíz de tomate cv. Clermon.

meq L ⁻¹		N	P	K	Ca	Mg
		mmol kg ⁻¹				
K	7	1580.6	226.37a	42.39a	593.74a	121.66
	9	1466.7	182.52b	42.70a	506.21b	109.31
	11	1516.7	177.71b	49.95a	508.13b	111.68
	13	1516.7	172.60b	21.17b	562.38ab	108.40
Ca	9	1560.42	161.63b	29.56b	515.47	113.309
	11	1522.92	201.70a	55.43a	532.13	116.636
	13	1489.58	206.08a	32.16b	580.25	108.348
Anova						
K	P	ns	≤0.0067	≤0.001	≤0.04	Ns
Ca	P	ns	≤0.0046	≤0.001	ns	Ns
Interacción		ns	Ns	≤0.001	ns	Ns
CV (%)		13.986	16.989	26.164	13.500	18.787

P ≤ ns, 0.05, 0.001= no significativo y significativo; Interacción= K x Ca; CV= coeficiente de variación; Las letras a y b son las categorías obtenidas de la comparación de media con Duncan (α = 0.05).

Figura 8. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de K en raíz de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.



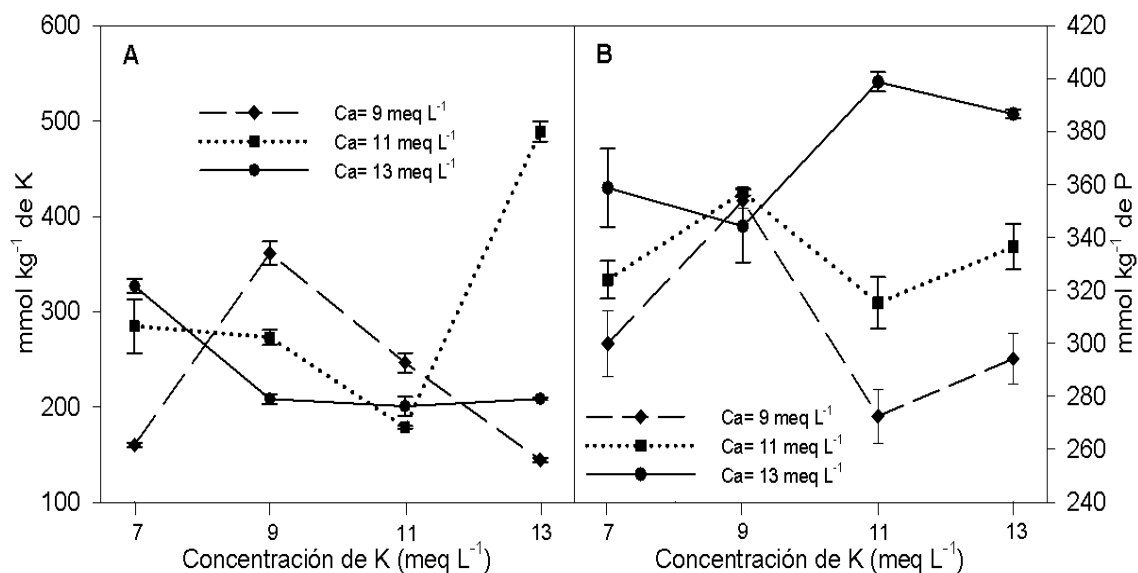
La concentración de P en la parte aérea fue afectada por la concentración de Ca, mientras que la concentración de Ca en el tejido fue influenciado por la concentración de K en la SN (Cuadro 5), la concentración de K y magnesio (Mg) fueron afectados por la concentración K y Ca, pero, el Mg disminuye al incrementar el K y Ca en la SN. La interacción entre estos factores influye en la concentración de P y K (Cuadro 5). La concentración de P aumenta al incrementar Ca en la SN, siendo mayor esto con 11 meq L⁻¹ de K (Figura 9B). El K en el tejido aumenta con 9 meq L⁻¹ de Ca y 9 meq L⁻¹ de K en la SN, sin embargo, este aumento es superior con 11 meq L⁻¹ de Ca y 13 meq L⁻¹ de K (Figura 9A).

Cuadro 5. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de macronutrientes en parte aérea en tomate cv. Clermon.

meq L ⁻¹		N	P	K	Ca	Mg
		mmol kg ⁻¹				
K	7	2170.63	327.58	257.12a	959.00a	283.83a
	9	2177.78	351.81	280.85a	892.55ab	259.20ab
	11	2106.94	328.84	208.54b	822.47bc	249.85bc
	13	2211.11	339.11	280.57a	776.13c	227.53c
Ca	9	2186.31	305.12c	228.03b	843.01	275.01a
	11	2181.25	333.25b	306.29a	866.54	244.52b
	13	2132.29	372.13a	235.99b	878.06	245.78b
Anova						
K	P	ns	Ns	≤0.007	≤0.005	≤0.001
Ca	P	ns	≤0.001	≤0.001	Ns	≤0.011
Interacción		ns	≤0.019	≤0.001	Ns	Ns
CV (%)		7.178	8.494	13.855	9.432	9.925

P ≤ ns, 0.05, 0.001 = no significativo y significativo; Interacción = K x Ca; CV = coeficiente de variación; Las letras a, b y c son las categorías obtenidas de la comparación de media con Duncan ($\alpha \leq 0.05$)

Figura 9. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de K y P en la parte aérea en tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.



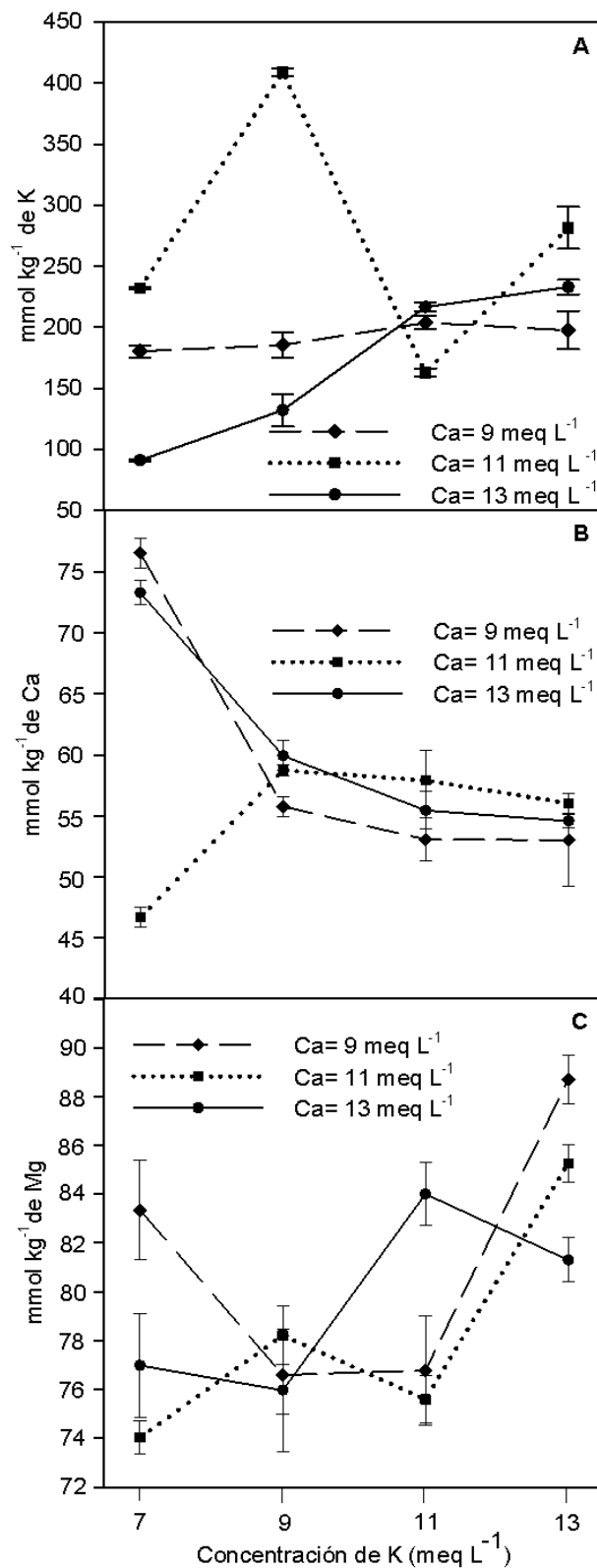
La concentración de K, Ca y Mg en el fruto fueron afectados por las concentraciones de K y Ca en al SN (Cuadro 6), la interacción de ambos factores también influyeron en la concentración de estos nutrimentos (Cuadro 6). La concentración de K en el tejido aumentó con 9 meq L⁻¹ de K y 11 meq L⁻¹ de Ca en la SN, sin embargo, con 13 meq L⁻¹ de Ca y con el incremento de la concentración de K en la SN aumenta la concentración de K en el fruto, aunque sea en menor proporción (Figura 10A). La concentración de Ca en el fruto es mayor con 7 meq L⁻¹ de K con 9 y 13 meq L⁻¹ de Ca en la SN, pues superiores a estas concentraciones disminuye (Figura 10B). La concentración de Mg es mayor con 13 meq L⁻¹ de K y 9 meq L⁻¹ de Ca en la SN, además, en menor proporción hay un incremento de la concentración de este nutrimento al aumentar la concentración de K con 11 y 13 meq L⁻¹ de Ca en la SN (Figura 10C).

Cuadro 6. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de macronutrientes en fruto de tomate cv. Clermon.

meq L ⁻¹		N	P	K	Ca	Mg
		mmol kg ⁻¹				
K	7	1416.67ab	174.77	167.85b	65.52a	78.12b
	9	1394.44b	181.12	242.14a	58.16b	76.92b
	11	1433.33ab	180.86	194.44b	55.50b	78.79b
	13	1529.37a	184.32	237.35a	54.56b	85.08a
Ca	9	1483.33	176.95	191.88b	59.62a	81.35a
	11	1412.50	178.13	271.29a	54.87b	78.28b
	13	1434.52	185.72	168.17b	60.82a	79.56ab
Anova						
K	P	ns	Ns	≤0.001	≤0.007	≤0.001
Ca	P	ns	Ns	≤0.001	≤0.024	≤0.010
Interacción		ns	Ns	≤0.001	≤0.001	≤0.004
CV(%)		8.741	8.464	14.255	8.862	4.123

P ≤ ns, 0.05, 0.001 = no significativo y significativo; Interacción = K x Ca; CV = coeficiente de variación; Las letras a y b son las categorías obtenidas de la comparación de media con Duncan ($\alpha \leq 0.05$).

Figura 10. Efecto de la interacción K:Ca en la concentración de K, Ca y Mg en fruto de tomate cv. Clermon. Las barras indican el error estándar de la media.



El aumento de la concentración de Ca en la SN disminuye la concentración de K en la raíz, parte aérea y fruto, esta disminución puede ser debida por un efecto antagónico con el Ca ya que son iones de la misma carga. También probablemente este efecto se debe a una concentración alta de Ca en la rizosfera por lo que provoca el desplazamiento de K de los sitios de absorción (Wegner y De Boer, 1997). Otra vía por la cual puede estar afectando la absorción de K es a través de la hiperpolarización (Maathuis y Sanders, 1997) y esto es controlada por la alta concentración de Ca en la membrana celular, lo cual provoca inactividad en los canales de K (Isayenkov *et al.*, 2010; Demidchik *et al.*, 2002). Rubio *et al.* (2010) observó en plantas de pimiento una disminución de la concentración de K en la raíz al elevar la concentración de Ca en la SN y una disminución en la concentración de Ca en la parte aérea y raíz al incrementar la concentración de K en la SN. Al aumentar la concentración de K disminuye la concentración de P en la raíz y parte aérea, este aumenta al incrementar la concentración del Ca en la SN. La disminución de la concentración de P en la raíz puede ser debido a que este nutriente es poco móvil en la planta a diferencia de la alta movilidad del K (Fageria, 2001; Wall., 1940). Mientras que el aumento de la concentración de Ca favorece la absorción de P, probablemente puede ser por un efecto de sinergismo o porque el Ca necesita al P para cumplir muchas de sus funciones y también ambos iones son necesarios en la estabilidad de la membrana celular a través de la unión de fosfolípidos (Tuteja, 2009). El aumento de la concentración de Ca en la SN disminuye la concentración de Mg en la parte aérea y en el fruto, este mismo efecto se presenta al incrementar la concentración de K a diferencia que este incrementa la concentración de Mg en el fruto. Este comportamiento se debe a la competencia con el Ca en los sitios de unión en la membrana plasmática de la raíz, parecen tener menos afinidad por el Mg (Marschner, 1986) además de ser dos cationes divalentes que compiten por los sitios y canales de absorción (Paiva *et al.*, 1998). La alta concentración de K podría afectar al Mg en la diferencia en la movilidad en la planta (Ananthanarayama y Hanumantharaju, 1992). También este comportamiento podría ser debido a la competencia entre

Mg y K para los sitios activos en la membrana plasmática, donde las proteínas de transporte están situadas (Marschner, 1995). Se ha reportado que algunos transportadores de Mg también pueden transportar otros cationes como K. Por lo tanto, una alta disponibilidad de K en la rizósfera inhibirá la absorción de Mg (Gransee y Führs 2013). Al incrementar K en la SN se observó un efecto distinto en la concentración de Mg en el fruto, pues este fue mayor con el incremento de la concentración de K, esto puede ser debido a que exista una retraslocación del Mg hacia el fruto (Karley *et al.*, 2009). Mientras que Ding *et al.* (2006) señala que en plantas de arroz hay una disminución de la concentración de Mg en raíz y tallos, al incrementar la concentración de K en la SN.

CONCLUSIONES

Una concentración de Ca >11 meq L⁻¹ mejora la firmeza y contenido de carotenoides totales pero, disminuye la cantidad de licopeno afectando el color del fruto.

Al incrementar la concentración de K hasta 13 meq L⁻¹ mejoró el contenido de azúcares, pero el rendimiento disminuye.

Al aplicar 9 meq de K y 11 meq de Ca, existe un sinergismo pues mejora la concentración de K en el fruto, estas concentraciones equivalen a una relación de 0.82, a esta proporción aumenta el rendimiento, peso seco total y altura de planta. Asimismo, de acuerdo con nuestros resultados el K es el que más refleja y es necesario para mejorar el rendimiento y la calidad del fruto.

El K y Ca presentan un antagonismo, entre ellos debido a que al incrementar o disminuir la concentración de estos cationes, afecta su absorción entre sí y la de otros iones de la misma carga (Mg).

LITERATURA CITADA

- Adams, P., Davies, J.N. and Winsor, G.W. 1978. Effects of nitrogen, potassium and magnesium on the quality and chemical composition of tomatoes grown in peat. *J. Hort. Sci.* 53, 115-122.
- Ahmad, I. and Maathuis, F. J. 2014. Cellular and tissue distribution of potassium: physiological relevance, mechanisms and regulation. *Journal of plant physiology*, 171(9), 708-714.
- Almeselmani, M., Pant, R. C. and Singh, B. 2009. Potassium level and physiological response and fruit quality in hydroponically grown tomato. *International journal of vegetable science*, 16(1): 85-99.
- Amtmann, A. and Blatt, MR. 2009. Regulation of macronutrient transport. *New Phytol* 181:35–52.
- Amtmann, A., Hammond, JP., Armengaud, P. and White, PJ. 2006. Nutrient sensing and signalling in plants: potassium and phosphorus. *Adv Bot Res* 43:209–257.
- Ananthanarayama, R. and Hanumantharaju, T.H. 1992. Interactions of Ca and Mg with other plant nutrients. In: H.L.S Tandon (Ed). 51-65.
- Anthon, G.E. and Spanswick, R.M. 1986. Purification and properties of the H⁺-translocating ATPase from the plasma membrane of tomato roots. *Plant Physiology*.81: 1080–1085.
- Armstrong, MJ. and Kirby, EA. 1979. Estimation of potassium recirculation in tomato plants by comparison of the rates of potassium and calcium accumulation in the tops with their fluxes in the xylem stream. *Plant Physiol* 63:1143–1148.
- Barber, SA. 1995. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*, 2nd ed. Wiley, New York.
- Barber, SA. and Ozanne, PG. 1970. Autoradiographic evidence for differential effect of 4 plant species in altering calcium content of rhizosphere soil. *Soil Sci Soc Am Proc* 34:635–637.
- Bar-tal, A. and Pressman, E. 1996. Root restriction and potassium and calcium solutions concentrations affect dry-matter production, cation uptake and blossom-end rot in greenhouse tomato. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 121:649-655.
- Baxter, I., Hosmani, PS., Rus, A., Lahner, B., Borevitz, JO., Muthukumar B., Mickelbart, MV., Schreiber, L., Franke, RB. and Salt, DE. 2009. Root

- suberin forms an extracellular barrier that affects water relations and mineral nutrition in *Arabidopsis*. *PLoS Genet* 5:100-492.
- Bergmann, W. 1992. Nutritional disorders of plants. Development, visual and analytical diagnosis. Gustav Fisher Verlag, Jena, Germany.
- Besford, R.T. and Maw, G.A. 1975. Effects of potassium nutrition on tomato plant growth and fruit development *Plant Sci.* 42:395-412.
- Bidari, B.I. and Hebsur, N.S. 2011. Potassium in relation to yield and quality of selector vegetable crops. *Karnataka J. Agric. Sci.*, 24(1): 55–59.
- Bould, C. and Tsai-Fua, C. 1976. Mobility of calcium in fruit plants. *Proc. 4th Intern. Coll. Gent* 1, 104-108.
- Bramley, H., Turner, NC., Turner, DW. and Tyerman, SD. 2010. The contrasting influence of short-term hypoxia on the hydraulic properties of cells and roots of wheat and lupin. *Func Plant Biol* 37:183–193.
- Bramley, P. M. 2002. Regulation of carotenoid formation during tomato fruit ripening and development. *Journal of Experimental Botany*, 53, 2107–2113.
- Bremner, J. M. 1996. Total nitrogen. In: Sparks, D. L. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part II. Chemical Methods.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, WI. USA. 1085-1086 pp.
- Britto, DT. and Kronzucker, HJ. 2008. Cellular mechanisms of potassium transport in plants. *Physiol Plant* 133:637–650.
- Broadley, MR., Bowen, HC., Cotterill, HL., Hammond, JP., Meacham, MC., Mead A. and White PJ. 2004. Phylogenetic variation in the shoot mineral concentration of angiosperms. *J Exp. Bot* 55:321–336.
- Bush, D.S. 1995. Calcium regulation in plant cells and its role in signaling. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 46: 95-122.
- Cakmak, I. 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4):521-530.
- Cakmak, I. 2014. Major functions of calcium and magnesium in crop plants. In *World Fertilizer Congress*. 16: 30.
- Camacho, D.G., Castillo, A.M.G., Avitia, E.G. y Rubí, M.A. 1999. Contenido de azúcares solubles en hojas e inflorescencias de tres cultivares de Aguacatero (*Persea americana* Mill.). *Rev. Chapingo S. Hort.* 5:77-81.

- Campos Hernández, E. 1985. Evaluación de la calidad de los frutos de los árboles de tipo criollo de mamey (*Calocarpum mammosum*) para su mejoramiento selectivo. Tesis profesional. Químico Farmacéutico Biólogo. UNAM. D. F., México.
- Carvajal, M., Martínez, V. and Cerda, A. 1999. Influence of magnesium and salinity on tomato plants grown in hydroponic culture. *J. Plant Nutr.* 22: 177-190.
- Cholewa, E. and Peterson, CA. 2004. Evidence for symplastic involvement in the radial movement of calcium in onion roots. *Plant Physiol* 134:1793–1802.
- Clarkson, D.T. and Sanderson, J. 1978. Sites of absorption and translocation of iron in barley roots. Tracer and micro-autoradiographic studies. *PlantPhysiol.* 61: 731-736.
- Clarkson, DT. 1984. Calcium-transport between tissues and its distribution in the plant. *Plant Cell Environ* 7:449–456.
- Conn, S. and Gilliham, M. 2010. Comparative physiology of elemental distributions in plants. *Ann Bot* 105:1081–1102.
- Cooper, T. and Bangerth, F. 1976. The effect of calcium and magnesium treatment on the physiology, chemical composition and bitter-pit development of “Cox orange” apples. *Sci. Hort.* 5: 49-57.
- De Boer, AH. and Volkov, V. 2003. Logistics of water and salt transport through the plant: structure and functioning of the xylem. *Plant Cell Environ* 26:87–101.
- De Kreij, C. 1995. Latest insights into water and nutrient control in soilless cultivation. *Acta Hort.* 408: 47-61.
- Demidchik, V. and Maathuis, FJM. 2007. Physiological roles of not selective cation channels in plants: from salt stress to signaling and development. *New Phytol* 175:387–404.
- Demidchik, V., Bowen, H. C., Maathuis, F. J. M., Shabala, S. N., Tester, M. A., White, P. J. and Davies, J. M. 2002. Arabidopsis thaliana root non-selective cation channels mediate calcium uptake and are involved in growth. *Plant J.* 32: 799–808.
- Ding, Y., Luo, W. and Xu, G. 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology.* 149 (2): 111-123.

- Dolan, L. and Davies, J. 2004. Cell expansion in roots. *Curr Opin Plant Biol* 7:33–39.
- Dorais, M., Papadopoulus, A.P. and Gosselin, A. 2001. Greenhouse tomato fruit quality. *Hort. Rev.* 26: 239-319.
- Elder Antonio, S. Paiva., Reginaldo, Arruda. Sampaio. and Herminia, E. Prieto Martínez. 1998. Composition and quality of tomato fruit cultivated in nutrient solutions containing different calcium concentrations, *Journal of Plant Nutrition*, 21:12: 2653-2661.
- Epstein, E. 1961. The essential role of calcium in selective cation transport by plant cells. *Plant Physiol.* 36: 437-444.
- Fageria, N.K. 1983. Ionic Interactions in Rice Plants from Dilute Solutions. *Plant Soil*, 70, 309-316.
- Fageria, N.K. and Baligar, V.C. 1999. Growth and Nutrient Concentrations of Common Bean, Lowland Rice, Corn, Soybean, and Wheat at Different Soil pH on an Inceptisol. *J. Plant Nutr.* 22: 1495-1507.
- Fageria, V. D. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of plant nutrition*, 24(8): 1269-1290.
- Faiyue, B., Al-Azzawi, MJ. and Flowers, TJ. 2010. The role of lateral roots in bypass flow in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Cell Environ* 33:702–716.
- Fanasca, S., Colla, G., Maiani, G., Venneria, E., Roupael, Y., Azzini, E. and Saccardo, F. 2006. Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(12): 4319-4325.
- Fish W. W., Perkins-Veazie P. and Collins J. K. 2002. A Quantitative Assay for Lycopene That Utilizes Reduced Volumes of Organic Solvents. *Journal of Food Composition and Analysis* 15(3): 309-317.
- Fricke, W., Leigh, RA. and Tomos, AD. 1994. Concentrations of inorganic and organic solutes in extracts from individual epidermal, mesophyll and bundle-sheath cells of barley leaves. *Planta* 192:310–316.
- Giuliano, G., G. E. Bartlety, and P. A. Scolnik. 1993. Regulation of carotenoid biosynthesis during tomato development. *The Plant Cell* 5: 379-387.
- Gransee, A. and Führs, H. 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, 368(1-2): 5-21.

- Grimme, H., Von Braunschweig, L.C. and Nemeth, K. 1974. Potassium, calcium and magnesium interactions as related to cation uptake and yield. *Landw. Forsch.* 30/II. SONDERH. 93-100.
- Hampton, CR., Broadley, MR. and White, PJ. 2005. Short review: the mechanisms of radiocaesium uptake by Arabidopsis roots. *Nukleonika* 50:S3–S8.
- Hao, X. and Papadopoulos, A.P. 2003. Effects of calcium and magnesium on growth, fruit yield and quality in a fall greenhouse tomato crop grown on rockwool. *Can. J. Plant Sci.* 83: 903-912.
- Hayashi, H. and Chino, M. 1990. Chemical composition of phloem sap from the uppermost internode of the rice plant. *Plant Cell Physiol.* 31:247–51.
- Isayenkov, S., Isner, J. C. and Maathuis, F. J. 2010. Vacuolar ion channels: roles in plant nutrition and signalling. *FEBS letters*, 584(10): 1982-1988.
- Jeschke, WD. 1983. Cation fluxes in excised and intact roots in relation to specific and varietal differences. *Plant Soil* 72:197–212.
- Jones, J.B. 1999. Tomato plant culture: In the field, greenhouse, and home garden. CRC Press LLC, Florida. 11-53.
- Jungk, A. and Claassen, N. 1997. Ion diffusion in the soil-root system. *Adv Agron* 61:53 110.
- Kallarackal, J., Bauer, SN., Nowak, H., Hajirezaei, M-R. and Komor, E. 2012. Diurnal changes in assimilate concentrations and fluxes in the phloem of castor bean (*Ricinus communis* L.) and tansy (*Tanacetum vulgare* L.). *Planta*; 236:209–23.
- Karley, A. J., and White, P. J. 2009. Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. *Current opinion in plant biology*, 12(3): 291-298.
- Karley, AJ., Leigh, RA. and Sanders, D. 2000a. Differential ion accumulation and ion fluxes in the mesophyll and epidermis of barley. *Plant Physiol* 122:835–844.
- Karley, AJ., Leigh, RA. and Sanders, D. 2000b. Where do all the ions go? The cellular basis of differential ion accumulation in leaf cells. *Trends Plant Sci* 5:465–470.
- Kays, S.J. 1991. Postharvest physiology of perishable plant products. AVI Books, New York.

- Kerton, M., Newbury, HJ., Hand, D. and Pritchard, J. 2009. Accumulation of calcium in the centre of leaves of coriander (*Coriandrum sativum* L.) is due to an uncoupling of water and ion transport. *J Exp Bot.* 60:227–235.
- Keunecke, M., Lindner, B., Seydel, U., Schulz, A. and Hansen, U-P. 2001. Bundle sheath cells of small veins in maize leaves are the location of uptake from the xylem. *J Exp Bot* 52:709–714.
- Kirkby, E.A. and Mengel, K. 1976. The role of magnesium in plant nutrition. *Pflanzenern. u. Bodenkde.* 2: 209-222.
- Kochian, LV. and Lucas, WJ. 1988. Potassium transport in roots. *Adv Bot Res* 15:93–178.
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology; Ecophysiology and stress physiology of functional groups.* Fourth edition. Springer. 513 p.
- Leigh, RA. and Storey, R. 1993. Intercellular compartmentation of ions in barley leaves in relation to potassium nutrition and salinity. *J Exp Bot* 44:755–762.
- Leigh, RA. and Wyn Jones, RG. 1984. A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. *New Phytol* 97:1–13.
- Logan, DC. and Knight, MR. 2003. Mitochondrial and cytosolic calcium dynamics are differentially regulated in plants. *Plant Physiol* 133:21–24.
- López, M.V. and Satti, S.M.E. 1996. Calcium and potassium-enhanced growth and yield of tomato under stress. *Plant Sci.* 114: 19-27.
- Maathuis, F. and Sanders, D. 1997. Regulation of K external K: Interplay of different plasma membrane K absorption in plant root cells by transporters. *J. Exp. Bot.* 48: 451–458.
- MacRobbie, EAC. 2006. Osmotic effects on vacuolar ion release in guard cells. *Proc Natl Acad Sci USA* 103:1135–1140.
- Marschner, H. 1986. *Mineral nutrition of higher plants.* Second edition. Academic Press, London. 889 p.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants.* Second edition. Academic Press, San Diego, California.
- Marschner, H. Kirkby, EA. and Engels, C. 1997. Importance of cycling and recycling of mineral nutrients within plants for growth and development. *Bot Acta* 110:265–273.

- Martínez, J. R., Vicente, A. A., Saenz, J. C. M., Herrera, R. R., y González, C. N. A. 2012. Un tesoro perecedero en México: el tomate, tecnologías para prolongar su vida de anaquel. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (54). 57-63.
- McAinsh, MR. and Pittman, JK. 2009. Shaping the calcium signature. *New Phytol* 181:275–294.
- Megel, K. and Kirkby, E. A. 2000. Principios de nutrición vegetal. Traducción al español de la 4ª edición (1987). Internacional Potash Institute. Basel, Switzerland. 692 p.
- Mengel K. and Kirkby E.A. (2001): Principles of plant nutrition. 5th ed., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht. pp: 849 México. 366 p.
- Mengel, K. and Kirkby, E.A. 2001: Principles of plant nutrition. 5th ed., Kluwer Academic, Publisher. Dordrecht. pp: 849 México. 366 p.
- Moran, N. 2007. Osmoregulation of leaf motor cells. *FEBS Lett* 581:2337–2347
- Mouline, K., Very, A-A., Gaymard, F., Boucherez, J., Pilot, G., Devic, M., Bouchez, D., Thibaud, J-B. and Sentenac, H. 2002. Pollen tube development and competitive ability are impaired by disruption of a Shaker K⁺ channel in Arabidopsis. *Gene Dev* 16:339–350.
- Munson, R.D. 1985. Potassium in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Navarro, B. S. and Navarro G. G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Ediciones Mundi–Prensa, Madrid. 487 p.
- Nukaya, A., Goto, K., Jang, H., Kano, A. and Ohkawa, K. 1995. Effect of NH₄-N level in the nutrient solution on the incidence of blossom-end rot and gold specks on tomato fruit grown in rockwool. *Acta Hort.* 401, 381-388.
- Paiva, E.A.S., Sampaio, R.A. and Martínez, H.E.P. 1998. Composition and quality of tomato fruit cultivated in nutrient solution containing different calcium concentrations. *J. Plant Nutr.* 21: 2653-2661.
- Papadopoulos, A. P. 2003. Effects of calcium and magnesium on growth, fruit yield and quality in a fall greenhouse tomato crop grown on rockwool. *Canadian Journal of Plant Science*, 83(4): 903-912.
- Pardo, JM., Cubero, B., Leidi, EO. and Quintero, FJ. 2006. Alkali cation exchangers: roles in celular homeostasis and stress tolerance. *J Exp Bot* 57:1181–1199.

- Passam, H.C., Karapanos, I.C., Bebeli, P.J. and Savvas, D. 2007. A review of recent research on tomato nutrition, breeding and post-harvest technology with reference to fruit quality. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* 1(1): 1-21.
- Pettigrew, WT. 2008. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiol Plant* 133:670–681.
- Peuke, AD., Jeschke, WD. and Hartung, W. 2002. Flows of elements, ions and abscisic acid in *Ricinus communis* and site of nitrate reduction under potassium limitation. *J Exp Bot* 53:241–250.
- Possingham, J.V., 1980. Plastid replication and development in the life cycle of higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31: 113-129.
- Rengel, Z. and Damon, PM. 2008. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. *Physiol Plant* 133:624–636.
- Rodríguez, C.C. and Ortega M.L.D. 1976. Determinación de azúcares y almidón en frijol mecentral. *Agrociencia* 4:76-88.
- Rubio, J. S., García-Sánchez, F., Flores, P., Navarro, J. M. and Martínez, V. 2010. Yield and fruit quality of sweet pepper in response to fertilisation with Ca²⁺ and K⁺. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8.1. 170-177.
- Sai, J. and Johnson, CH. 2002. Dark-stimulated calcium ion fluxes in the chloroplast stroma and cytosol. *Plant Cell* 14:1279–1291.
- Sanders, D., J. Pelloux, C., Brownlee, J.F. and Harper. 2002. Calcium at the crossroads of signaling. *Plant Cell* S401-S417.
- Schimanski, C. 1981. The influence of certain experimental parameters on the flux characteristics of Mg-28 on the case of barley seedlings grown in hydroculture. *Landw. Forsch.* 34, 154-165.
- Schreiber, L., Franke, R., Hartmann, KD., Ranathunge, K. and Steudle, E. 2005. The chemical composition of suberin in apoplastic barriers affects radial hydraulic conductivity differently in the roots of rice (*Oryza sativa* L. cv. IR64) and corn (*Zea mays* L. cv. Helix). *J Exp Bot* 56:1427–1436.
- Shear, C.B. 1975. Calcium-related disorders of fruits and vegetables. *Hort Science* 10: 361-365.
- Soltanpour, P. N., Johnson, G. W., Workman, S. M., Jones, J. B. Jr. and Miller, R. O. 1996. Inductively coupled plasma emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. In: Sparks, D. L. (Ed.).

- Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Science Society of America. Madison, WI. 91-139 pp.
- Subbaiah, CC., Bush, DS. and Sachs, MM. 1988. Mitochondrial contribution to the anoxic Ca^{2+} signal in maize suspension-cultured cells. *Plant Physiol* 118:759–771.
- Trudel, M.J. and Ozbun, J.L. 1971. Influence of potassium on carotenoid content of tomato fruit. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 96: 763-765.
- Tuteja, N. 2009. Integrated calcium signaling in plants. In *Signaling in Plants*. pp. 29-49. Springer Berlin Heidelberg.
- V. D. Fageria. 2001: Nutrient interactions in crop plants, *Journal of Plant Nutrition*, 24:8, 1269-1290
- Voogt, W. 1998. The growth of beefsteak tomato as affected by K/Ca ratios in the nutrient solution. Glasshouse Crops Research Station Naaldwijk, The Netherlands.
- Wall, M.E. 1940. The Role of Potassium in Plants. *Soil Sci.* 1940, 49, 393-408.
- Watanabe, T., Broadley MR, Jansen, S., White, P.J., Takada, J, Satake, K., Takamatsu, T., Tuah, SJ. And Osaki, M. 2007. Evolutionary control of leaf element composition in plants. *New Phytol* 174:516–523.
- Wegner, LH. and De Boer, AH. 1997. Two inward K channels in the xylem parenchyma cells of barley roots are regulated by G-protein modulators through a membrane delimited pathway. *Planta* 203:506–16.
- Whitam, F.H., Blaydes D.F. and Devlin, R.M. 1971. *Experiments in Plant Physiology*. Van Nostrand Reinhold. New York, USA. 245 p.
- White, P. J. and Broadley, M. R. 2003. Calcium in plants. *Annals of botany*, 92.4. 487-511.
- White, P.J. and R.J. Davenport. 2002. The voltage- independent cation channel in the plasma membrane of wheat roots is permeable to divalent cations and be involved in cytosolic Ca^{2+} homeostasis. *Plant Physiol.* 130, 1386-1395.
- White, P.J. 1997a. Cation channels in the plasma membrane of rye roots. *J Exp Bot* 48:499–514.
- White, P.J. 1997b. The regulation of K^+ influx into roots of rye (*Secale cereale* L.) seedlings by negative feedback via the K^+ flux from shoot to root in the phloem. *J Exp Bot* 48:2063–2073.

- White, P.J. 2001. The pathways of calcium movement to the xylem. *J Exp Bot* 52:891–899.
- White, P.J., Earnshaw MJ. and Clarkson, DT. 1991. Effects of growth and assay temperatures on unidirectional K⁺ fluxes in roots of rye (*Secale cereale*). *J Exp Bot* 42:1031–1041.
- Yang, T. and B.W. Poovaiah. 2003. Calcium/calmodulin- mediated signal network in plants. *Trends Plant Sci.* 8(10): 505-512.

Página electrónica

SAGARPA (2015) México como primer exportador de Tomate. Consulta: 15 de noviembre 2015. Disponible en:
<http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2015B466.aspx>