

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT



SISTEMA DE BIBLIOTECAS

POTENCIAL OSMÓTICO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN EL CRECIMIENTO Y EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL DE CHILE HÚNGARO



FREDI ISABEL SALAZAR JARA

Tesis presentada como requisito parcial para la obtención del grado de:
Maestría en Ciencias en el Área de Ciencias Agrícolas

XALISCO, NAYARIT; JUNIO DE 2014

Xalisco, Nayarit., 05 de junio de 2014

Dr. J. Diego García Paredes
Coordinador del Posgrado
P r e s e n t e

Los suscriben, integrantes del Comité Tutorial del C. **Fredi Isabel Salazar Jara**, declaramos haber revisado y corregido la tesis con título "**Potencial osmótico de la solución nutritiva en el crecimiento y extracción nutrimental de chile húngaro,**" por lo que aprobamos su impresión para que se prosigan con los trámites para la obtención de grado de Maestría.

Sin otro asunto que tratar, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E



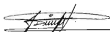
Dr. Porfirio Juárez López
Director



Dr. Rubén Bugarín Montoya
Co-director



Dr. Gelacio Alejo Santiago
Asesor



Dr. J. Diego García Paredes
Asesor



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS

CBAP/148/14

Xalisco, Nayarit; 10 de junio de 2014

Ing. Alfredo González Jáuregui
Director de Administración Escolar
P r e s e n t e.

Con base al oficio de fecha 05 de junio de 2014, enviado por los CC. **Dr. Porfirio Juárez López, Dr. Rubén Bugarín Montoya, Dr. Gelacio Alejo Santiago y Dr. J. Diego García Paredes**, donde se nos indica que el trabajo de tesis cumple con lo establecido en forma y contenido, y debido a que ha cumplido con los demás requisitos que pide el Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Nayarit, se autoriza al **C. Fredi Isabel Salazar Jara**, continúe con los trámites necesarios para la presentación del examen de grado de maestría.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
"Por lo Nuestro a lo Universal"

Dr. J. Diego García Paredes
Coordinador del Posgrado

C.c.p.-Expediente.

Ref.

DEDICATORIAS

Con todo el cariño a los seres que más aprecio

A mis padres:

Pánfilo Salazar Hernández y Piedad Jara Ocampo

Quienes con su gran esfuerzo moral y económico me brindaron su apoyo y me guiaron hacia el camino correcto del trabajo, honradez y la lealtad, para la conclusión de mis estudios de maestría, hoy sus sueños y mi sueño se convierte en realidad.

A mis hermanos:

Yini, Eleno, Lorena, Horacio, Jelasio, Jaime y Freddy

Gracias a su apoyo y a sus palabras alentadoras, que me brindaron la oportunidad de formarme como un profesional.

A mi novia:

Diely Monserrath Rosales Avalos, Por su amor, cariño y apoyo incondicional que me brindó.

A la tía **Teresa Flores Lizola***, por el cariño y apoyo incondicional que me brindó, gracias.

-

AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Autónoma de Nayarit, a la Unidad Académica de Agricultura y al posgrado del CBAP, por brindarme la oportunidad de culminar este posgrado. Al Coordinador de la misma y profesores-investigadores que la componen por su impulso y aceptación de mi tema de tesis. Gracias.

Al Dr. Porfirio Juárez López, Director de tesis, porque gracias a su apoyo y disponibilidad incondicional que mostró en los trabajos de campo, laboratorio y gabinete, fue posible concluir este trabajo, además de impulsarme a salir mi maestría en ciencias, así como la motivación para continuar adelante. Gracias.

Al Cotutor Dr. Rubén Bugarín Montoya, por sus sugerencias, apoyo incondicional y profesionalismo en el manejo de datos para hacer de este un buen trabajo. Gracias.

Al Dr. Gelacio Alejo Santiago, por sus acertadas orientaciones, sugerencias, participación en el análisis de muestras de laboratorio. Gracias.

Al Dr. Juan Diego García Paredes, Por haberme iniciado en el campo de la investigación, pero sobre todo por brindarme su amistad. Gracias.

Al Dr. Álvaro Can Chulim por revisarme mi tesis y brindarme sugerencias acertadas.

A mis maestros del posgrado del CBAP. Gracias por todas sus enseñanzas.

A mis compañeros de generación

Mi más sincera gratitud por el recuerdo, apoyo y compañerismo que me brindaron en los momentos más difíciles de mi maestría profesional.

A todos mis compañeros, amigos.

A todas las personas que de alguna manera u otra, contribuyeron en la realización de este trabajo de investigación. Gracias.

Y sobre todo a Dios.

ÍNDICE

ÍNDICE DEL CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. El cultivo de chile en el mundo	3
2.2. Importancia del cultivo del chile en México y en Nayarit	3
2.3. Nutrición mineral del cultivo de chile	4
2.4. Elementos minerales esenciales y sus funciones	5
2.4.1. Macronutrientes	5
2.4.1.1. Carbono, hidrógeno y oxígeno	5
2.4.1.2. Nitrógeno	6
2.4.1.3. Fósforo	7
2.4.1.4. Potasio	7
2.4.1.5. Azufre	8
2.4.1.6. Calcio	8
2.4.1.7. Magnesio	9
2.4.2. Micronutrientes	10
2.4.2.1. Hierro	10

2.4.2.2. Cobre	11
2.4.2.3. Zinc	11
2.4.2.4. Manganeso	11
2.5. Contenido nutrimental foliar en plantas de pimiento	12
2.6. Dosis de fertilización	13
2.7. Extracción y requerimiento nutrimental en Chile	14
2.8. Programa de fertirrigación del Chile tipo húngaro	17
2.9. Los sistemas hidropónicos en invernaderos	18
2.10. La solución nutritiva	19
2.10.1. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva	20
2.10.2. Presión osmótica (PO) de la solución nutritiva	21
2.10.3. Potencial osmótico (Ψ_o) de la solución nutritiva	22
2.11. Efectos del potencial osmótico (Ψ_o) sobre los cultivos	23
2.12. El pH de la solución nutritiva	24
2.13. Sustratos	26
3. OBJETIVOS	27
4. HIPÓTESIS	27
5. MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1. Localización del experimento	28
5.2. Material genético	28
5.3. Producción de planta para trasplante	29
5.4. Diseño experimental	30

5.5. Solución nutritiva	31
5.6. Establecimiento y conducción del experimento	32
5.6.1. Trasplante	32
5.6.2. Manejo agronómico	32
5.6.2.1. Riego	32
5.6.2.2. Podas y tutoreo	33
5.6.3. Variables evaluadas	33
5.6.3.1. Altura de planta	33
5.6.3.2. Número de frutos por planta	34
5.6.3.3. Producción total de frutos por planta	34
5.6.3.4. Índice de cosecha	34
5.6.3.5. Biomasa seca aérea acumulada	34
5.6.3.6. Concentración nutrimental foliar	35
5.6.3.7. Concentración nutrimental en la biomasa aérea	35
5.6.3.8. Extracción nutrimental en la biomasa aérea	35
5.7. Análisis estadístico	35
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
6.1. Altura de planta	36
6.2. Número de frutos por planta	36
6.3. Producción total de frutos frescos por planta(g·planta ⁻¹)	36
6.4. Materia seca aérea total acumulada	37

6.5. Índice de cosecha ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	38
6.6. Concentración nutrimental foliar	39
6.6.1. Macronutrientes	39
6.6.1.1. Nitrógeno	39
6.6.1.2. Fósforo	40
6.6.1.3. Potasio	40
6.6.1.4. Calcio	41
6.6.1.5. Magnesio	41
6.7. Concentraciones foliares de macronutrientes a través del tiempo	42
6.8. Micronutrientes	44
6.9. Concentraciones foliares de micronutrientes a través del tiempo	45
6.10. Correlaciones entre variables	47
6.11. Extracción nutrimental en la biomasa aérea	47
7. CONCLUSIONES	51
8. REFERENCIAS	52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Niveles de referencia de contenido nutrimental en hoja para el cultivo de chile pimiento.	12
Cuadro 2. Concentración nutrimental al inicio de la floración en plantas jóvenes de pimiento.	13
Cuadro 3. Extracción de macronutrientes en plantas de chile (<i>Capsicum annuum</i> L.) tipo pimiento y chile jalapeño, considerando la biomasa total.	15
Cuadro 4. Requerimiento nutrimental específico en plantas de chile influenciadas por la variedad y el rendimiento (Adaptado de Terbe <i>et al.</i> , 2006).	16
Cuadro 5. Requerimiento nutrimental específico ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$) de dos genotipos (HRF F ₁ y Duna F ₁), de chile pimiento, influenciado por la tecnología de producción. Las cantidades es el promedio de tres años (Adaptado de Terbe <i>et al.</i> , 2006.).	16
Cuadro 6. Extracción nutrimental acumulada de N, P ₂ O ₅ , K ₂ O Ca y Mg del pimiento en invernadero.	18
Cuadro 7. Composición química de la Solución Nutritiva Steiner (1984).	20
Cuadro 8. Concentraciones de micro nutrimentos en la solución nutritiva (Steiner, 1984).	20
Cuadro 9. Composición química de los tratamientos de la solución nutritiva en función del potencial osmótico en el experimento de chile tipo húngaro (Adaptado de Steiner, 1984).	30
Cuadro 10. Cantidad de fertilizantes para preparar 1100 L de solución nutritiva.	31

Cuadro 11. Efecto del potencial osmótico de la solución nutritiva en la producción de materia seca, número de frutos, producción de frutos por planta e índice de cosecha en el cultivo de chile (<i>Capsicum annuum</i> L.) tipo húngaro, a los 140 ddt.	37
Cuadro 12. Concentración de macro nutrientes en hojas al momento de la cosecha en relación a cinco niveles de Ψ_o de la solución nutritiva, en chile tipo húngaro.	40
Cuadro 13. Contenido de macronutrientes en plantas de chile húngaro en siete fechas de muestreo, establecidas en solución nutritiva con -0.054 MPa de potencia osmótico.	42
Cuadro 14. Concentración de micro nutrientes en relación a cinco niveles de Ψ_o , en el estudio requerimiento nutricional de chile tipo húngaro.	44
Cuadro 15. Concentración foliar de micronutrientes en plantas de chile húngaro en siete fechas de muestreo, establecidas en solución nutritiva con -0.054 MPa de potencial osmótico.	46
Cuadro 16. Correlaciones entre macronutrientes en plantas de chile húngaro.	47
Cuadro 17. Extracción de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn en el cultivo de chile húngaro (<i>Capsicum annuum</i> L.). Xalisco, Nayarit. 2013.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disponibilidad de nutrimentos a distintos intervalos de pH. UPV (2003).	25
Figura 2. Chile húngaro (var. Inferno).	28
Figura 3. Producción de chile tipo húngaro para trasplante	29
Figura 4. Trasplante de chile tipo 'Húngaro' en las unidades experimentales.	32
Figura 5. Tutorio de plantas de chile tipo Húngaro	33
Figura 6. Curvas de extracción acumulada de macronutrimentos (a) y micronutrimentos (b) en plantas de chile tipo húngaro durante un ciclo de cultivo. Xalisco, Nayarit	49

RESUMEN

El chile tipo húngaro (*Capsicum annuum* L.) es una especie que se cultiva en la costa de Nayarit y con potencial de incrementar su superficie de cultivo; sin embargo, existe escasa información relacionada con su manejo nutrimental mineral. Con el objetivo de cuantificar el contenido y extracción nutrimental, así como determinar el potencial osmótico de la solución nutritiva más apropiado para el crecimiento y rendimiento del cultivo de chile tipo húngaro, se determinó la absorción y la curva de extracción de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn. Se desarrolló un experimento completamente al azar en condiciones de hidroponía. Se evaluaron 5 niveles de Ψ_0 : -0.018, -0.036, -0.054, -0.072, -0.09 MPa. El sustrato empleado fue tezontle rojo. Se cuantificó la acumulación de materia seca, rendimiento de fruto y se determinó N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn. El mejor tratamiento de potencial osmótico fue -0.054 MPa. La extracción de macronutrientes (g-planta^{-1}) obtenida al final del ciclo fue 11.0, 1.3, 14.9, 3.4 y 0.6 de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Para micronutrientes: Fe, Zn, Cu y Mn (mg-planta^{-1}) fue de 23.5, 18.1, 19.9 y 39.4, respectivamente. La cantidad de macronutrientes para producir una tonelada de fruto fue: 3.1, 0.4, 4.2, 1.0 y 0.2 kg de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente, mientras que para micronutrientes (mg-planta^{-1}) fue 6.7, 5.1, 5,

.6 y 11.2 de Fe, Zn, Cu y Mn, respectivamente.

Palabras clave: Chile húngaro, potencial osmótico, solución nutritiva, rendimiento.

ABSTRACT

Hungarian wax pepper (*Capsicum annuum* L.) is a species that is grown on the coast of Nayarit and potential to increase its acreage; however, there is scarce information related with their mineral nutrient management. In order to quantify the content and nutrient removal, as well as determine the osmotic potential of the nutrient solution more appropriate for growth and crop yield of Hungarian wax pepper, absorption and extraction curve was determined of N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu and Mn. An experiment was developed completely random in hydroponic conditions. 5 levels of Ψ_0 were evaluated: -0.018, -0.036, -0.054, -0.072, -0.09 MPa. The substrate used was red volcanic rock (locally called 'tezontle').

Accumulation of dry matter, fruit yield was measured and N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn and Mn were determined. The best treatment was -0.054 MPa of osmotic potential. The macro nutrient removal ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$) obtained at the end of the cycle was 11.0, 1.3, 14.9, 3.4 and 0.6 of N, P, K, Ca and Mg, respectively. For micronutrients ($\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$) was 23.5, 18.1, 19.9, and 39.4 of Fe, Zn, Cu and Mn, respectively. The amount of nutrient to produce one ton of fruit was 3.1, 0.4, 4.2, 1.0 and 0.2 kg of N, P, K, Ca and Mg, respectively, while as for micronutrients ($\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$) was 6.7, 5.1, 5.6 and 11.2 of Fe, Zn, Cu and Mn, respectively.

Key words: Hungarian wax pepper, osmotic potential, nutrient solution, yield.

1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento y la calidad del cultivo de chile (*Capsicum annum* L.) tipo húngaro depende de varios factores, los internos de la planta que están determinados por el genotipo y otros que son de tipo externo como las condiciones climáticas, las características del suelo o sustrato, calidad del agua, factores nutrimentales, la técnica de producción y los factores bióticos. Algunos como son los factores climáticos en los cultivos en invernadero, otros en alguna medida pueden ser objeto de control, como lo es el caso de la nutrición del cultivo (Marschner, 2012; Pineda *et al.*, 2008; Alcántar *et al.*, 2007; Castro *et al.*, 2000).

Para el manejo de la nutrición, el diagnóstico nutrimental basado en las concentraciones nutrimentales en la materia seca, es una herramienta útil que permite identificar concentraciones nutrimentales asociadas con deficiencias, toxicidades o desbalances nutrimentales en diferentes etapas fenológicas de la planta y su relación con su potencial de rendimiento (Medina, 2010; Munson y Nelson, 1990).

Existe escasa información básica y aplicada relacionada con el manejo de la nutrición de este cultivo y su relación con el rendimiento. En la medida de lo posible que se cuente con esta información, será viable adecuar las prácticas de fertilización que favorezcan la expresión de rendimiento del cultivo y que permita, a la vez, hacer más eficiente el uso de los recursos suelo, planta, fertilizante y ambiente (Pineda *et al.*, 2008; Castro *et al.*, 2000; Galvis *et al.*, 1998).

En este sentido, resulta indispensable generar conocimiento sobre cómo hacer más eficaces las agro técnicas de producción, haciendo énfasis en la optimización del aporte de fertilizantes con el propósito de disminuir costos de producción y reducir el impacto negativo sobre el ambiente, pero que al mismo tiempo se

propicie una óptima calidad y cantidad de los productos cosechados (Azofeifa y Moreira, 2005 y 2004; Galvis *et al.*, 1998) y Una forma de abordar lo anterior es mediante el desarrollo de técnicas de diagnóstico que permitan relacionar la demanda nutrimental del cultivo con la oferta nutrimental del suelo (Bar-Tal, 2001; Galvis *et al.*, 1998). La demanda es función de la biomasa total que se acumula durante el ciclo del cultivo y del requerimiento interno nutrimental. Este último parámetro se refiere a la concentración del nutrimento de interés en la biomasa aérea total, obtenido al momento de la cosecha bajo una nutrición óptima y es independiente del rendimiento (Escalona y Pire, 2008; Castro *et al.* 2004, 2000; Galvis *et al.*, 1998).

En este contexto, para calcular la demanda total del nutrimento de interés se requiere conocer la extracción del elemento en cuestión, por tonelada de producto cosechado y este resultado multiplicarlo por el rendimiento esperado (Castro *et al.*, 2004; Galvis, 1998).

Por lo anteriormente expuesto, se conoce que el requerimiento nutrimental de los cultivos puede presentar amplia variabilidad en función del rendimiento, lo cual a su vez es influido por las condiciones de crecimiento y desarrollo, los genotipos, el potencial de rendimiento, entre otros factores. Es importante estudiar detalladamente estas interrelaciones para que las recomendaciones de fertilización sean las óptimas para el cultivo en cuestión.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cultivo de chile en el mundo

El chile (*Capsicum spp.*) es una planta originaria de México. Existen evidencias de que se utilizaba en la cocina prehispánica como condimento básico para los platillos (Tapia, 1994). Perteneció a la familia de las Solanáceas y comprende 23 especies, las cuales son diploides y poseen doce pares de cromosomas (Milla, 1996); entre ellas sólo cinco son cultivadas: *C. annum*, *C. baccatum* (particularmente variedades *pendulum*), *C. frutescens*, *C. pubescens* y *C. chinense*. Sin embargo, *Capsicum annum* es la especie más importante y difundida, sobre las que hay más trabajos de mejora genética.

El chile en sus diversas variedades, se consume principalmente en países latinoamericanos, africanos y asiáticos, mientras que en Estados Unidos y algunos países europeos se consume en menor cantidad, por lo que en la mayoría de los casos, se destina al mercado interno de los países productores; sin embargo, recientemente ha incrementado el interés de exportación a Estados Unidos y Japón (Namesny, 2006).

2.2. Importancia del cultivo del chile en México y en Nayarit

El chile (*Capsicum annum* L.) es uno de los cultivos más importantes en México por su gran consumo en la población. Su importancia social reside en el hecho de ser un cultivo intensivo que requiere una elevada cantidad de mano de obra, la cual es aproximadamente de 120 a 200 jornales por hectárea cosechada.

En cuanto a su importancia económica, en el año 2012 en México se cosecharon 136,131.61ha, con una producción total de 2,379, 716.67 toneladas, un rendimiento promedio de 17.48 t·ha⁻¹, y un valor de producción de 13, 284, 426,329.28 pesos (SIAP, 2013). En el Estado de Nayarit se cosecharon 1,805.5ha,

con un rendimiento promedio de 25.6 t·ha⁻¹, y un valor de producción de 272,625,953 pesos (SIAP, 2013).

Existen varios tipos comerciales de chile, entre los que destacan: los chiles anchos, jalapeño, serrano, pimiento y mirasol, conocido como guajillo en seco. Por otro lado, hay tipos de chile que en los últimos años han incrementado su superficie de cultivo debido a los precios estables que mantienen a lo largo del año en el mercado, tales como el chile habanero, manzano, caloró y el chile tipo húngaro. Específicamente, el chile tipo húngaro es un cultivo que ha sido poco estudiado pero que tiene amplio potencial para cultivarse en el estado de Nayarit tanto a campo abierto como en condiciones de invernadero.

2.3. Nutrición mineral del cultivo de chile

Los avances científicos en nutrición vegetal y fertilización han revolucionado la producción de los cultivos. La ciencia de la nutrición comenzó aproximadamente hace 150 años con los experimentos clásicos de Liebig, Lawes y Gilbert, de Saussure entre otros y es uno de los soportes para solucionar la crisis mundial de alimentos (Taiz y Zeiger, 2010). La nutrición mineral incluye el suministro, absorción y utilización de los nutrimentos esenciales para el crecimiento y producción de los cultivos (Fageria, 2009).

La nutrición de una planta para su mantenimiento y crecimiento es a base de una serie de sustancias inorgánicas minerales simples, como son nutrientes, agua, CO₂, O₂, e intervienen diferentes factores ambientales como son la radiación solar y temperatura, entre otros (Noguera *et al.*, 1997).

Es importante tomar en consideración la etapa fenológica del cultivo para la fertilización, ya que la tasa de absorción de nutrientes por el cultivo, e incluso para cada órgano vegetal en particular, varía en función del tiempo (Bautista, 2010).

2.4. Elementos minerales esenciales y sus funciones

Para ser considerado esencial en el crecimiento de las plantas, un elemento debe cumplir los tres criterios de esencialidad planteados por Arnon y Stout: 1) la planta no podrá completar su ciclo de vida normal en la ausencia del elemento, 2) la acción del elemento debe ser específica y ningún otro elemento puede sustituirlo completamente, 3) el elemento deberá estar directamente implicado en la nutrición de la planta, esto es, ser un constituyente de un metabolito o ser necesaria su presencia para la acción de una enzima esencial y no ser simplemente la causa de que otros elementos sean más fácilmente asimilables (Resh, 2013). Solamente 17 elementos están considerados como esenciales para el crecimiento de la mayoría de las plantas. Estos están divididos en macro nutrientes, que son aquellos requeridos en mayor cantidad por las plantas; y micro nutrientes, aquellos que son requeridos en menor cantidad (Salisbury y Ross, 2003).

2.4.1. Macronutrientes

2.4.1.1. Carbono, hidrógeno y oxígeno

Los carbohidratos constituyen la estructura básica de las plantas y son la fuente de energía metabólica, dentro de ellos se incluyen a numerosos ácidos orgánicos, azúcares simples y complejos, polímeros de azúcares como almidón, celulosa y hemicelulosa. En cuanto a la distribución del peso de la planta, 45 % corresponde al carbono, 6 % al hidrógeno y 43 % al oxígeno. Por ello, más de 90 % del peso seco de un cultivo se deriva del aire y del agua (Resh, 2013).

El carbono es absorbido en la forma de CO_2 de la atmósfera y posiblemente en la forma de HCO_3^- de la solución del suelo. La incorporación de carbono está acompañada por la asimilación simultánea de oxígeno, porque no sólo el carbono sino CO_2 y HCO_3^- son metabolizados (Mengel y Kirkby, 2001).

El oxígeno forma parte de la mayoría de los compuestos orgánicos, solamente unos pocos "como el caroteno" no lo contienen. También permite el intercambio de

aniones entre las raíces y el medio exterior. Es receptor terminal del H^+ en la respiración aerobia (Resh, 2013).

El hidrógeno se absorbe en la forma de agua de la solución del suelo o en condiciones de humedad de la atmósfera. En el curso de la fotosíntesis, el H_2O se reduce y el hidrógeno es transferido a través de una serie de pasos hasta reducir a la nicotinamida adenina di nucleótido fosfato ($NADP^+$) a NADPH (Fageria, 2007).

El hidrógeno juega un papel central en el metabolismo de la planta, es muy importante en el intercambio de cationes en las relaciones planta-suelo y en los balances iónicos (Fageria y Baligar, 2006).

2.4.1.2. Nitrógeno

Es esencial en la división y expansión celular, por tanto en el crecimiento. La adenina es una base púrica con nitrógeno en el anillo y es parte de muchos nucleótidos y nucleoproteínas, como el ADN y ARN. El nitrógeno también es constituyente de una multitud de compuestos llamados alcaloides, que no son metabolitos esenciales y se cree sirven como compuestos que almacenan este elemento (Jones *et al.*, 1991).

Aunque el nitrógeno inorgánico puede acumularse en forma de nitrato, el nitrógeno orgánico predomina en las plantas como proteínas de alto peso molecular. Del nitrógeno total en el tejido verde, las proteínas representan aproximadamente de 80 a 85 %, los ácidos nucleicos 10 % y el amino soluble 5 % (Mengel y Kirkby, 2001). En los cloroplastos de las células foliares, 75 % del nitrógeno orgánico se encuentra como proteínas enzimáticas (Marschner, 2012).

El nitrógeno consiste de 1.5 a 6.0 % del peso seco de muchos cultivos, con valores de suficiencia para chile pimiento de 3.5 a 5 % en tejido foliar (Mills y Jones, 1996). Los valores críticos varían considerablemente dependiendo de la especie de cultivo, etapa de crecimiento y parte de la planta. Las concentraciones más altas se encuentran en las hojas nuevas y el nitrógeno total de la planta

normalmente disminuye con la edad. El nitrógeno, como nitrato, se puede acumular en concentraciones considerables del orden de más de 1000 mg kg^{-1} en el tejido conductivo en peciolo y tallos, durante el periodo vegetativo de crecimiento (Marschner, 2012).

2.4.1.3. Fósforo

El fósforo es un constituyente de los compuestos que transfieren energía; "forma enlaces ricos en energía en metabolitos importantes como ATP, ADP, AMP y PPI", del sistema de información genética (ADN y ARN), de las membranas celulares (fosfolípidos), fosfoproteínas, aminoácidos y ciertas coenzimas (Alpi y Tognoni, 1991). La principal función del fosfato en el metabolismo es la formación de enlace pirofosfato que permite la transferencia de energía. El compuesto más importante de este tipo es el ATP, así la energía puede ser transportada a varios procesos endergónicos como la absorción de iones y la síntesis de varios compuestos orgánicos (Mengel y Kirkby, 2001).

Este elemento consiste de 0.15 a 1.0 % del peso seco de muchos cultivos con valores de suficiencia para Chile pimiento de 0.35 a 1 % en hojas recientemente maduras (Mills y Jones, 1996).

2.4.1.4. Potasio

El potasio tiene un efecto benéfico en la síntesis de ATP, como éste se requiere para numerosas reacciones de síntesis, el potasio puede indirectamente promover la síntesis de varios compuestos orgánicos como proteínas, azúcares y polisacáridos (Taiz y Zeiger, 2010).

Está involucrado en el mantenimiento del estado hídrico de la planta, en la presión de turgencia de sus células e interviene en la apertura y cierre de estomas, por lo que las plantas bien abastecidas con potasio pierden poca agua, incrementan el potencial osmótico y se influye favorablemente en el cierre estomático. La poca pérdida de agua se debe a la reducción de la tasa de transpiración, que depende

del potencial osmótico de las células del mesófilo y de la apertura y cierre de estomas, mecanismos que dependen completamente del flujo de potasio. En los tejidos jóvenes, el potasio es indispensable para obtener una turgencia celular óptima que se requiere para la expansión celular (Mengel y Kirkby, 2001).

Este elemento consiste de 1.0 a 5.0 % del peso seco del tejido foliar recientemente maduro para chile pimienta (Mills y Jones, 1996). Los valores de suficiencia para pimienta van de 3.5 a 4.5 %. En hortalizas los valores de suficiencia pueden llegar a ser de 6 a 8 % en el tejido de los tallos (Jones *et al.*, 1991).

2.4.1.5. Azufre

La mayor parte del azufre en las plantas se encuentra en las proteínas, específicamente en los aminoácidos cisteína y metionina (Taiz y Zeiger, 2010).

Está presente en todos los centros activos de las enzimas SH; forma parte de las vitaminas tiamina (B1) y biotina, la coenzima A, el péptido glutatión, la ferredoxina y en los glucósidos, como el aceite de mostaza que contribuyen al olor y sabor característico de plantas de las familias Cruciferae y Liliaceae (Jones *et al.*, 1991; Taiz y Zeiger, 2010).

El contenido de azufre en el tejido foliar para pimienta varía de 0.15 a 0.5 % del peso seco. Los valores del contenido de azufre total varían en cada cultivo y etapa de crecimiento (Mills y Jones, 1996).

2.4.1.6. Calcio

El calcio en la pared celular está asociado con los grupos carboxilo libres de las pectinas, satura la mayoría de estos sitios y forma pectatos de calcio, que unen a las paredes primarias de las células adyacentes. Este nutrimento se necesita para mantener la integridad de las membranas y para su permeabilidad, enlaza a los fosfolípidos entre sí o a proteínas de membrana. También se cree que es esencial

para la estructura de la matriz del núcleo de la célula. Activa las enzimas unidas a la membrana y algunas que participan en la mitosis, división y alargamiento celular. Las concentraciones bajas, casi micro molares de calcio en el citosol impiden la formación de sales de calcio insolubles a partir de ATP y otros fosfatos orgánicos (Alcantar y Trejo, 2006).

La translocación dentro de la planta es en la savia del xilema en dirección acrópetala con la corriente de transpiración. En las hojas, el flujo de calcio disminuye después de su madurez, aun cuando se mantenga una transpiración constante. En plantas en crecimiento, el calcio es translocado preferentemente hacia los ápices de los brotes aunque la tasa de transpiración es mucho menor que en las hojas viejas. Es probable que este movimiento preferencial sea inducido por la auxina AIA, que se sintetiza en el ápice del brote. El transporte basipétalo del AIA hace que el Ca^{2+} se transporte de manera acrópetala. La tasa de translocación de calcio es muy baja debido a que es transportado en muy baja concentración en el floema. Como resultado de lo anterior, todos los órganos vegetales que son proveídos con nutrimentos por la savia del floema, como frutos y órganos de almacenamiento, son también bajos en calcio (Sonneveld y Voogt, 2009).

El análisis nutrimental refleja que el contenido de calcio en una hoja con deficiencia es menor a 1.0 %; mientras que, en una hoja normal para pimiento es de 1.9 a 6.0 % (Mills y Jones, 1996).

2.4.1.7. Magnesio

El magnesio es el centro de la molécula de clorofila, específicamente en el centro del anillo tetra pirrol y es necesario para la formación de otros pigmentos. Forma quelatos con ADP, ATP y varios ácidos orgánicos, por lo que es esencial en cientos de reacciones enzimáticas, durante la formación de DNA y RNA funciona como un puente entre las estructuras piro fosfatadas del ATP o ADP y la molécula

de la enzima, la activación de la ATPasa por el magnesio se produce por esta función de puente (Alcantar y Trejo, 2006).

El magnesio activa las enzimas de la fosforilación de la fotosíntesis y de la fosforilación oxidativa, además de las fosfoquinasas y algunas deshidrogenasas y enolasas. Una reacción clave del magnesio es la activación de la RUBISCO, como consecuencia de esa activación, el magnesio tiene un efecto favorable en la asimilación de CO_2 y procesos relacionados como producción de azúcar y almidón (Alcantar y Trejo, 2006).

El valor de suficiencia para Chile pimiento varía entre 0.3 a 2.8 % del peso seco del tejido foliar (Mills y Jones, 1996).

2.4.2. Micronutrientes

Son constituyentes inorgánicos de enzimas especiales (Lorete *et al.*, 1998). Estos elementos minerales a comparación de los elementos antes citados son requeridos por las plantas en muy pequeñas cantidades; sin embargo no por ello dejan de ser importantes, ya que su carencia ocasiona serios problemas a las plantas, pudiendo provocar incluso hasta la muerte. En este grupo encontramos el hierro, cobre, zinc, manganeso, boro, cloro y el molibdeno (Troeh y Thompson, 2005).

2.4.2.1. Hierro

El hierro es absorbido preferentemente por las raíces como ión ferroso (Fe^{2+}), forma en la cual es más aceptable para ser introducido en la estructura de las biomoléculas, y sobre todo más soluble en la solución del suelo. Es absorbido también por la epidermis foliar y por la superficie de las ramas. En la planta es transformado en ión férrico (Fe^{3+}) y transferido en forma quelatada con ácido cítrico a las hojas donde es almacenado como ferritina (ferro proteína) (Humphries *et al.*, 2007).

El contenido en las plantas es elevado en comparación con el resto de los micro elementos. En los tejidos varía desde 25 a más de 250 ppm en peso seco, sin embargo en zonas meristemáticas y en hojas es donde se encuentra la mayor cantidad, no obstante valores inferiores a 50 ppm en peso seco pueden causar deficiencias (Mills y Jones, 1996).

2.4.2.2. Cobre

El cobre es importante como coenzima necesario para activar diversas enzimas vegetales. También se haya implicado en la formación de clorofila (Lorete *et al.*, 1998). La escasez de cobre ocasiona la acumulación de hierro en la planta. El exceso de cobre da lugar a síntomas cloróticos, semejantes a los que indican la deficiencia de hierro (Humphries *et al.*, 2007). Como el cobre presenta escasa movilidad en la planta, la sintomatología de las deficiencias es más evidente en los órganos nuevos y crecimientos recientes (Troeh y Thompson, 2005). Los contenidos en hoja son bajos y oscilan entre 6 y 25 ppm en peso seco (Mills y Jones, 1996).

2.4.2.3. Zinc

El zinc se absorbe bajo la forma Zn^{2+} o como quelato, es un elemento poco móvil, los contenidos en las plantas son bajos y oscilan entre 20 y 200 ppm en peso seco (Mills y Jones, 1996).

Participa en la formación y funcionamiento de diversos sistemas enzimáticos que intervienen en procesos vitales para las plantas además de formar parte de varias enzimas como la deshidrogenasa málica, la anhidrasa carbónica, la aldolasa, la deshidrogenasa alcohólica (Troeh y Thompson, 2005).

2.4.2.4. Manganeso

El manganeso se absorbe bajo la forma de Mn^{2+} o como quelato, los contenidos en las plantas oscilan según la especie vegetal siendo los tejidos verdes los que

contienen mayor cantidad (Troeh y Thompson, 2005). En las hojas en Chile pimiento el Mn oscila entre 50 y 250 ppm en peso de materia seca. Es un elemento poco móvil e interviene en numerosos procesos metabólicos que realizan las plantas, participa en el proceso de fotosíntesis (Mills y Jones, 1996).

2.5. Contenido nutrimental foliar en plantas de pimiento

Son diversos los factores que influyen en la absorción de nutrientes por el cultivo, entre los que cabe señalar: material vegetal, condiciones ambientales, calidad del agua de riego y técnicas de cultivo. De todos los órganos vegetativos de la planta, las hojas han mostrado ser las que dan una información más precisa de la absorción de los nutrientes.

A continuación se presentan los valores medios de referencia de la concentración mineral de la hoja del pimiento.

Cuadro 1. Niveles de referencia de contenido nutrimental en hoja para el cultivo de Chile pimiento.

Elemento	Alto	Normal	Medio
Nitrógeno (%)	5.1-6.0	4.0-5.0	3.0-3.9
Fósforo (%)	0.7-0.8	0.3-0.7	0.2-0.3
Potasio (%)	5.6-6.0	4.5-5.5	3.5-4.5
Calcio (%)	4.1-5.0	2.0-4.0	0.5-1.9
Magnesio (%)	1.8-2.5	1.0-1.7	0.5-0.9
Manganeso (ppm)	201-500	90-200	41-89
Hierro (ppm)	201-500	80-200	61-80
Cobre (ppm)	21-50	10-20	0.5-10
Boro (ppm)	61-80	20-60	13-19
Zinc (ppm)	61-100	25-60	15-24

Fuente: Cadahia (2005).

En Chile pimiento, Campbell (2009) encontró los siguientes intervalos de suficiencia (Cuadro 2).

Cuadro 2. Concentración nutrimental al inicio de la floración en plantas jóvenes de pimiento.

Nitrógeno	Fosforo	Potasio	Calcio	Magnesio
3.0-5.0%	0.3-0.5%	2.5-5.0%	0.9-1.5%	0.3-0.5%

Hierro	Manganeso	Zinc	Cobre
30-150 ppm	30-100 ppm	25-80 ppm	5-10 ppm

2.6. Dosis de fertilización

Un modelo para calcular la dosis de fertilización fue propuesto en la década de los años setentas por Stanford (1973), que posteriormente desarrolló Rodríguez (1990) en la república de Chile y que Galvis (1998) desarrolló en México para cereales. Este modelo está expresado de la siguiente manera:

$$\text{Dosis} = (\text{Dem} - \text{Sum})/\text{ERF}$$

La dosis de un nutriente puede estimarse a partir del conocimiento de la demanda del cultivo (Dem), la cual está en función del rendimiento esperado en un agroambiente específico; de la cantidad de nutriente que el suelo puede suministrar durante el ciclo de cultivo (Sum), que en sustratos inertes sería 0 y de la eficiencia con la que el cultivo puede aprovechar el nutriente que se aplica al suelo como fertilizante (ERF). Esta última es afectada por las características del sistema radicular de la planta, por la técnica de manejo del cultivo y la de aplicación del fertilizante. A pesar de que la expresión anterior aparentemente es sencilla, su empleo no se ha generalizado en el cálculo de dosis de fertilización, ello se debe a que no se cuenta con información que permita dar valor a sus componentes.

2.7. Extracción y requerimiento nutrimental en Chile.

La extracción nutrimental determina la cantidad de nutrimentos extraída por una planta, puede determinarse en una etapa fenológica determinada o a través del ciclo de cultivo, con las que se obtienen las curvas de extracción. Con esta información es posible conocer las épocas de mayor absorción de cada nutrimento y definir un programa de fertilización adecuado para el cultivo, en el cual se considere tanto la cantidad de fertilizante como la época idónea para hacer las aplicaciones (Pineda *et al.*, 2008). La extracción nutrimental por la planta es variable dentro de una misma especie, y esta depende del cultivar, el órgano muestreado, la tecnología de producción y el nutrimento (Cuadros 3, 4 y 5). (Pineda *et al.*, 2008; Terbe *et al.*, 2006; Azofeifa y Moreira, 2005).

Ante el aumento en el precio de los fertilizantes y el efecto de su uso excesivo sobre la contaminación del ambiente, en la actualidad, se hace más evidente la necesidad de aplicar los nutrimentos de manera racional (Ramos, 2002).

Una forma para establecer cuánto fertilizante debe aplicarse a los cultivos es mediante el cálculo de la cantidad de nutrimento requerido por la planta para expresar un rendimiento esperado, por lo tanto, la cantidad necesaria de nutrimento para producir una tonelada de producto debe ser un dato conocido (Amberger, 1993). Esta información se encuentra para muchas variedades de Chile (Cuadro 3). Sin embargo, la cantidad de nutrimento extraído por el cultivo muestra diferencias (Terbe *et al.*, 2006), que se deben a las condiciones de desarrollo, rendimiento, órgano de la planta y genotipo empleado (Cuadros 4 y 5).

Cuadro 3. Extracción de macronutrientes en plantas de chile (*Capsicum annuum* L.) tipo pimiento y chile jalapeño, considerando la biomasa total.

Autor	Genotipo empleado	Rendimiento tot ha ⁻¹	Extracción de nutrimento (kg ha ⁻¹)					Cantidad de nutrimento por tonelada de fruto cosechado (kg)*				
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Charlo <i>et al.</i> , 2012	Chile Pimiento	97.3	206	29	195	81	34	2.1	0.3	2	0.8	0.3
Terbe <i>et al.</i> , (2006)	Chile Pimiento							3	0.4	4.7		
Azofeifa y Moreira (2005)	Chile Pimiento	46.3	139	26	180	38	13	3	0.6	3.9	0.8	0.3
Fontes <i>et al.</i> , 2005	Chile Pimiento	51.9	193	23	247	114	42	3.7	0.4	4.8	2.2	0.8
Gyúrócs (2005)	Chile Pimiento	20						2.4	0.9	3.4		
PétiNitrokomplex (2004)	Chile Pimiento							2.4	1	3.5	1.8	0.3
Noronha (2004)	Chile Pimiento	80.12	212	22	205	83	42	2.6	0.3	2.6	1	0.5
Csathó (2004)	Chile Pimiento							2.4	0.9	3.5		
Agrolinz (2003)	Chile Pimiento							2.4	0.9	3.5		
Azofeifa y Moreira (2004)	Chile Jalapeño	15	60	7.6	79	8.2	7.3	4	0.5	5.3	0.6	0.5

* Las cantidades de nutrimento requeridas por tonelada de producto cosechado, fueron estimadas, a partir de la extracción nutrimental y rendimiento.

Cuadro 4. Requerimiento nutrimental específico en plantas de chile pimiento influenciadas por la variedad y el rendimiento (Adaptado de Terbe *et al.*, 2006).

Rendimiento t·ha ⁻¹	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	----- kg·t ⁻¹ -----		
Entre 10 y 50	2.8-9.0	0.4-1.2	3.3-11.7
Por arriba de 50	2.4-4.6	0.4-0.9	3.3-6.1
Variedades blocky por encima de 50	2.4-4.6	0.5-0.9	3.4-6.1
Variedades blancas por encima de 50	2.4-3.5	0.4-0.8	3.3-4.8

Cuadro 5. Requerimiento nutrimental específico (kg·t⁻¹) de dos genotipos (HRF F1 y Duna F1), de chile pimiento, influenciado por la tecnología de producción. Las cantidades es el promedio de tres años (Adaptado de Terbe *et al.*, 2006.).

Condición	Método de producción	N		P		K	
		HRF F ₁	Duna F ₁	HRF F ₁	Duna F ₁	HRF F ₁	Duna F ₁
H	T ₂	2.5	3	0.4	0.5	4.7	4.1
	B	3.2	3.8	0.5	0.4	5.8	3.8
C	T ₂	2.8	3.4	0.3	0.4	4.2	4.5
	B	2.7	3.1	0.3	0.4	4.2	5.5
S	T ₂	2.4	3.3	0.3	0.4	4.5	5.2
	B	2.7	3.2	0.4	0.4	4.8	4.9
Promedio		2.7	3.3	0.4	0.4	4.7	4.7

H = hidroponía, C = contenedor, S = suelo, T₂ = plantas con espalderas desarrolladas a dos tallos, B = plantas desarrolladas libremente.

Como puede apreciarse en los Cuadros 4 y 5, hubo diferencias en los niveles nutrimentales para raíz, tallo, hojas y frutos de chile. Para nitrógeno, los valores más altos y la mayor fluctuación se encontraron en las hojas, mientras que el contenido de nitrógeno en los frutos puede considerarse uniforme. Para el fósforo la concentraciones más altas se midieron en los frutos; y en los órganos muestreados, la fluctuación fue mayor que en el nitrógeno. El contenido de fósforo en los frutos resultó ser el más uniforme. Para el potasio, los valores más altos se alcanzaron en la hoja, seguido de los frutos y en los cuatro órganos el intervalo de

fluctuación fue mayor que en los otros dos elementos (N y P), en algunos casos más de tres o cuatro veces.

La composición nutrimental de los órganos de la planta de chile depende de varios factores ambientales, pero en primer lugar debido al suministro de nutrimentos, ya que en este sentido se muestra una amplia variación. La variación más pequeña fue medida en los frutos.

En investigaciones donde determinaron la extracción nutrimental en la parte aérea (hojas y tallos) y en frutos (Azofeira y Moreina, 2005; 2004), los valores nutrimentales variaron de acuerdo a la edad de la planta. Al final del ciclo, el K, Ca y Mg se acumularon principalmente en la parte aérea, el P y S en los frutos, y el N en los frutos y en la parte aérea. Los mismos autores encontraron variación de los valores nutrimentales en las etapas de desarrollo. Al final del ciclo, las plantas acumularon mayor cantidad de N, P, Mg, K y S en los frutos, y el Ca en la parte aérea.

Se concluye que la extracción y requerimientos nutrimentales en chile (*Capsicum annuum* L.) varían por tipos de chiles (jalapeño y pimiento), órganos muestreados y sistemas de producción por lo que se sugiere realizar investigaciones del requerimiento nutrimental en el cultivo de chile, en nuevas variedades y en otros tipos de chile, como es el caso de chile tipo húngaro, tomando en cuenta las condiciones bióticas y abióticas del cultivo.

2.8. Programa de fertirrigación del chile tipo húngaro

Un programa eficaz de fertirrigación en chile tipo húngaro debe basarse en el conocimiento de las curvas de absorción nutrimental del cultivo; es decir, la absorción de nutrientes en función del tiempo, tratando de ajustar las aportaciones nutrimentales al ritmo de extracción del cultivo. Además restituir al medio de cultivo los nutrientes extraídos por la planta (Azofeifa y Moreira, 2005).

Debido a que la información en Chile tipo húngaro es escasa y no se tienen curvas de extracción nutricional para este cultivo, en el Cuadro 6, se presentan las extracciones periódicas acumuladas de nutrientes necesarios para la obtención de 10 kg·m⁻² (100 t·ha⁻¹) de pimiento en invernadero.

Cuadro 6. Extracción nutricional acumulada de N, P₂O₅, K₂O Ca y Mg del pimiento en invernadero.

Tiempo medio	Kg ha ⁻¹				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg
Ddt					
35	1.8	0.3	3	1.2	0.5
55	8.8	1.6	18.5	5.7	2.3
70	26.25	5.2	52	16	6.5
85	46	8.5	91	26	10
100	85.5	20	163	55	22.5
120	140	32	273	71	32.5
140	215	54	370	91	45
165	293	76	460	121	63

Fuente: Rincón *et al.*, (1993). ddt: días después del trasplante.

2.9. Los sistemas hidropónicos en invernaderos

El uso simultáneo de la hidroponía e invernaderos, conlleva a una serie de ventajas sobre los sistemas convencionales de producción de plantas en suelo y a cielo abierto, entre los que destacan el ahorro de agua, el uso más eficiente de fertilizantes por medio de las soluciones nutritivas y el sistema de riego, generación de mano de obra y disminución de riesgo de pérdida de cosecha, además de la obtención de producción de buena calidad con mayor valor monetario (Baixauli y Aguilar, 2002).

El rendimiento por unidad de superficie potencialmente se puede incrementar con la mejora del manejo del cultivo en cuanto a control de malezas, plagas y enfermedades, uso de variedades mejoradas e híbridos, así como el manejo nutricional de la planta; por eso es importante el desarrollo de curvas de absorción del cultivo, para saber cualitativamente y cuantitativamente cuándo se hace

necesaria la aplicación de cada uno de los nutrimentos. En este sentido, la técnica de hidroponía proporciona información viable en cuanto a la determinación de la demanda nutrimental de un cultivo con mucha más seguridad que si se hiciera en suelo, ya que este último es muy complejo y puede haber mucho error experimental (Taiz y Zeiger, 2010).

2.10. La solución nutritiva

La fertilización de los cultivos en hidroponía es una labor que se efectúa todos los días a través del riego, el cual se suministra con una solución nutritiva diluida en la que se aportan todos los nutrientes esenciales en concentraciones adecuadas para lograr una nutrición apropiada con el fin de lograr buen crecimiento y desarrollo de las plantas (Bautista, 2010).

Para preparar la solución nutritiva se debe tener en cuenta la concentración de nutrimentos en el agua de riego. Generalmente el agua contiene Ca, Mg, S y B. También el agua contiene Na y Cl que en cantidades altas aumentan la salinidad del agua y pueden provocar toxicidad a las plantas (León y Martínez, 2004).

Existe una estrecha relación entre agua utilizada y cantidad de materia seca producida. Si se tiene en cuenta que existe un intervalo de concentración de nutrimentos referido a la materia seca acumulada por la planta, por lo cual las soluciones nutritivas deberán contener los iones en una concentración suficiente para satisfacer a tiempo las necesidades de agua y nutrimentos de la planta (Bautista, 2010).

En la solución nutritiva (Cuadro 7) todos los nutrimentos deben satisfacer las siguientes condiciones: 1) las relaciones mutuas deseadas entre aniones; 2) las relaciones mutuas deseadas entre cationes; 3) la concentración total de iones deseada; y 4) el valor deseado de pH con una tolerancia de ± 0.1 (Steiner, 1961).

Cuadro 7. Composición química de la Solución Nutritiva Steiner (1984).

Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	NO ₃	H ₂ PO ₄	SO ₄ ²⁻	Total
meq·L ⁻¹						
9	7	4	12	1	7	40

Steiner (1984) hizo mención general de los límites de las concentraciones de los micronutrientes por litro de solución nutritiva (Cuadro 8).

Cuadro 8. Concentraciones de micro nutrientes en la solución nutritiva (Steiner, 1984).

Elemento	μmol L ⁻¹	mg L ⁻¹
Fe	9-36	0.5-2.0
Mn	4-36	0.2-2.0
Zn	1.5-9	0.1-0.6
B	19-56	0.2-0.6
Cu	0.2-1	0.01-0.06
Mo	0.4-0.6	0.04-0.06

2.10.1. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva

La concentración total de solutos en la solución nutritiva se caracteriza por la conductividad eléctrica (CE), una propiedad fisicoquímica inherente de las soluciones que mide la facilidad con la que un medio acuoso transmite la electricidad y puede relacionarse directamente con la concentración de sales. Se expresa en deciSiemens por metro (dS m⁻¹), a 25 °C; o bien CE x -0.036 para expresarse como potencial osmótico (Ψ_o) en MPa (Sandoval *et al.*, 2008). Este último puede obtenerse al multiplicar (CE) x (-0.036) para ser expresado como potencial osmótico (Ψ_o) con unidades en mega pascales (MPa); o bien, para ser expresado como presión osmótica: CE x 0.36 como atmósferas (atm).

Dependiendo de la especie, variedad, así como la salinidad del agua, los rendimientos pueden disminuir de 0 a 100 % bajo condiciones salinas (Salisbury y Ross, 2004; De Páscale *et al.*, 2003).

El potencial osmótico de la solución nutritiva es importante pues al disminuir su valor, debido al aumento de la concentración de nutrientes, disminuye la energía libre del agua, afectando la absorción de nutrientes, principalmente de N, P, K, Ca y Mg (Bautista, 2010).

2.10.2. Presión osmótica (PO) de la solución nutritiva

La cantidad total de los iones de las sales disueltas en la solución nutritiva (SN) ejerce una fuerza llamada presión osmótica (PO); en la medida que aumenta la cantidad de iones se incrementa esta presión. La PO es una propiedad fisico-química de las soluciones, la cual depende de la cantidad de partículas o solutos disueltos. En la medida que la PO es mayor, las plantas de Chile deben invertir más energía para absorber el agua y los nutrientes, por lo cual la PO no debe elevarse más allá de los límites permisibles para las plantas (Asher y Edwards, 1983). La PO apropiada para los cultivos depende de la especie y de la variedad (Adams y Ho, 1992).

Una medida indirecta y empírica para determinar la PO de la SN es la CE, que sirve para indicar la concentración total de sales disueltas en el agua es multiplicar el valor de la CE de la SN por 0.36 (Rhoades, 1993); en cambio Steiner (1984) calcula la presión osmótica de la SN multiplicando el número total de mM por el factor 0.024. Por su parte, Sonneveld (1997) sugiere la siguiente ecuación para estimar la CE de una SN: $CE = \sum \text{de cationes o aniones}/10$.

Esta ecuación es útil para valores de CE de 0 a 5 dS m⁻¹, intervalo en el que se encuentra la CE teórica de la SN.

Una alta presión osmótica de la SN induce a una deficiencia hídrica de la planta y, además, ocasiona un desbalance nutricional, pues afecta principalmente a

aquellos nutrimentos que se mueven por flujo de masas, como el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , los cuales se absorben en menor cantidad (Ehret y Ho, 1986); también influye en la relación mutua de aniones en el interior de la planta, ya que al aumentar la presión osmótica se incrementa la proporción de H_2PO_4^- , y en menor magnitud, la del NO_3^- a expensas de los SO_4^{2-} . Es de esperarse que, al disminuir la presión osmótica en la SN, se presenten problemas en la absorción del H_2PO_4^- ; se favorezca la absorción del agua por las raíces y se limite la absorción de los iones que se mueven por difusión, como el P, K y el NH_4^+ ; mientras que las soluciones nutritivas concentradas limitan la absorción de los iones que se mueven por flujo de masas como el NO_3^- , Ca y Mg (Steiner, 1973).

2.10.3. Potencial osmótico (Ψ_o) de la solución nutritiva

El potencial osmótico (Ψ_o) es una propiedad físico-química de las soluciones, el cual depende de la cantidad de partículas o solutos disueltos (Segal, 1989). La importancia que representa el Ψ_o en una solución nutritiva es que al disminuir éste, por el incremento en la concentración de nutrimentos o de otros iones, la planta debe de efectuar un mayor esfuerzo para absorber agua y algunos nutrimentos (Asher y Eduards, 1983; Ehert y Ho, 1986a; Marschner, 2012). Es decir, tiene que invertir mayor cantidad de energía para llevar a cabo este proceso fisiológico. Ese desgaste de energía puede ser en detrimento de energía metabólica. El conjunto de estos fenómenos puede ser reflejado en una disminución del crecimiento o del desarrollo de la planta.

El Ψ_o de la solución nutritiva influye en la composición química de las plantas; por ejemplo, al disminuir el Ψ_o aumenta la concentración de K^+ en las plantas a expensas principalmente del Ca^{2+} , además se incrementa la concentración de P en la planta y en menor medida, la de NO_3^- , ambos a costa de los SO_4^{2-} . Este comportamiento se presenta independientemente de la etapa de desarrollo (Steiner, 1973). Por el contrario, aplicar menor cantidad de nutrimentos en la

solución nutritiva de la que necesita la planta, puede inducir deficiencias nutrimentales (Ehert y Ho, 1986b).

Con base en los conceptos termodinámicos, el PO es un componente del potencial hídrico (Ψ) de una solución. El Ψ es el potencial químico del agua en un sistema o parte de un sistema, expresado en unidades de presión, comparado con el potencial químico (mismas unidades) del agua pura a la presión atmosférica y a la misma temperatura.

Por convención se define al Ψ_o como el negativo de la presión osmótica y puede expresarse en términos de presión (MPa = mega Pascal). El valor del Ψ_o es cero en el agua pura, por lo que en soluciones nutritivas siempre es negativo, ya que al añadir solutos al agua siempre disminuye éste (Salisbury y Ross, 2004).

2.11. Efectos del potencial osmótico (Ψ_o) sobre los cultivos

Bautista (2010) evaluó en Chile manzano, 5 niveles de potencial osmótico: -0.036, -0.054, -0.072, -0.09 y -0.108 MPa, y encontró que los frutos de mejor calidad fueron aquellos a los que se aplicó la solución nutritiva con Ψ_o desde -0.072 hasta -0.108 MPa. En tomate rojo, Gallegos (2012) estudió 4 niveles de (Ψ_o): -0.072, -0.0804, -0.088 y -0.096 MPa, y tres tipos de tomate: saladette, bola y cherry, encontrando que los frutos que presentaron la mayor concentración de licopeno fueron aquellos a los que se aplicó la solución nutritiva con Ψ_o de -0.096 MPa.

Molinos *et al.* (2004) evaluaron el efecto de diferentes Ψ_o (-0.106; -0.113; -0.120; -0.128; -0.143 y -0.157 MPa) y concentración de Ca en el medio de cultivo sobre la distribución de Ca y K, y el peso de biomasa seca en explantes de vid. El mayor Ψ_o del medio de cultivo (-0.106 MPa) favoreció la translocación de Ca y K de los tallos hacia las hojas, mientras que el Ψ_o más negativo (-0.157 MPa) permitió que los mayores contenidos se acumularan en los tallos. El mayor peso de biomasa seca (57 mg) y los menores porcentajes de explantes con síntomas de deficiencia de Ca (20 %) se obtuvieron con el Ψ_o de -0.106 MPa. Por otro lado, Preciado *et al.* (2003) evaluaron el efecto de varios Ψ_o y concentraciones de la solución

modificada universal de Steiner, evaluaron el crecimiento y la absorción de nutrientes de plántulas en dos híbridos de melón ('Crusier' y 'Águila de Oro'), y obtuvieron el mejor crecimiento y la mayor absorción nutrimental en las plántulas de melón con un Ψ_0 de -0.072 MPa de la solución nutritiva pero no se tuvo efecto significativo en el crecimiento ni en la absorción de nutrimentos en los tratamientos.

De igual manera, Castro (2004) evaluó el efecto de cinco niveles de $N-NO_3^-$ (5, 7, 9, 11 y 13 meq L^{-1}) en la solución nutritiva a -0.054 MPa y obtuvo el valor más alto de acumulación de biomasa durante el ciclo agrícola con $411 \text{ g planta}^{-1}$ con un rendimiento de 2.15 kg de fruto por planta, en la condición nutrimental de 9 meq L^{-1} de $N-NO_3^-$.

2.12. El pH de la solución nutritiva

El pH de una solución es el logaritmo negativo de base 10, de la concentración molar del ion hidrógeno: $\text{pH} = -\log [H^+]$. Esta ecuación permite calcular la concentración de iones H^+ a partir del pH, donde $[H^+] = 10^{-\text{pH}}$. El pH de una solución es una propiedad inherente a su composición química y está determinado por la concentración de ácidos y bases (De Reijck y Schrevens, 1998). Estos mismos autores mencionan que el pH no puede ser cambiado sin alterar la composición química de la solución.

El pH apropiado de una solución para el buen desarrollo de los cultivos es generalmente de 5.5, a 6.5 aunque esto también está en función de la especie (Lara, 2000).

Uno de los factores que influyen notablemente en la asimilación de nutrimentos y por lo tanto en el rendimiento de las plantas es el pH. En hidroponía, al trabajar con sustratos inertes es necesario ajustar y mantener el pH al nivel deseado (Favela *et al.*, 2006). El pH ácido disminuye la absorción de cationes y estimulan la absorción de aniones, fundamentalmente porque el H^+ , compite con los cationes por los lugares de absorción. Esta situación se invierte a pH elevados, en los que

OH^- y HCO_3^- compiten con los aniones como NO_3^- , Cl^- o H_2PO_4^- , por sus sitios específicos de absorción. En cualquier caso deben evitarse valores de pH en la solución nutritiva inferiores a 5; a pH 4 se dañaría la raíz de la mayoría de los cultivos y superiores a 6.5, con lo que bajaría drásticamente la disponibilidad de algunos micro nutrientes; es por eso que las soluciones nutritivas deben ser mantenidas dentro de un rango que oscila generalmente de 5.5 a 6.5. (Sánchez y Escalante, 1988).

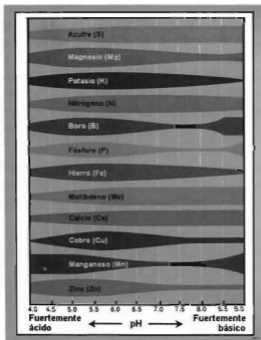


Figura 1. Disponibilidad de nutrientes a distintos intervalos de pH. UPV (2003)

2.13. Sustratos

El término sustrato se aplica en horticultura a todo material sólido distinto del suelo *in situ*, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor en forma pura o en mezcla permite el anclaje del sistema radical, desempeñando por tanto, un papel de soporte para la planta (Abad *et al.*, 2004).

El objetivo de este componente es sustituir al suelo, proporcionando a las plantas condiciones para su soporte. Existe una gran variedad de materiales que se pueden emplear, entre los más comunes se encuentran: arena, grava, tezontle, confitillo, ladrillos quebrados, perlita, vermiculita, turba, aserrín, resinas sintéticas (poliuretano), cascarilla de arroz, carbón, los cuales se emplean puros o en mezcla. Para que un sustrato sea utilizado, primero es necesario caracterizarlo con el propósito de conocer sus propiedades físicas, físico-químicas y biológicas, ya que estos factores determinarán el manejo posterior durante el desarrollo de las plantas (Ezquivel, 2001; Terés, 2001).

El tezontle rojo es uno de los sustratos más utilizados y es un mineral aluminosilicatado muy usado en la hidroponía por su buena capacidad de retención de humedad, buena aireación, inerte, estéril y económicamente accesible en la parte central del país (Bautista, 2010).

Derivado de lo anteriormente expuesto, en la presente investigación se plantea los siguientes:

3. OBJETIVOS

Determinar el potencial osmótico más apropiado para el crecimiento y rendimiento del cultivo de chile tipo húngaro en condiciones de invernadero e hidroponía.

Cuantificar la extracción acumulada de macro y micronutrientes a través del tiempo en la biomasa aérea y el contenido nutrimental foliar en plantas de chile tipo húngaro.

4. HIPÓTESIS

El potencial osmótico en el intervalo de -0.018 a -0.09 MPa de la solución nutritiva, genera una respuesta diferencial en el crecimiento, producción y extracción de macro y micronutrientes en las etapas fenológicas del cultivo de chile tipo húngaro, por lo que a través de su exploración será posible determinar el potencial osmótico donde se exprese la mejor respuesta agronómica.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización del experimento

El experimento se realizó en la Unidad Académica de Agricultura de la Universidad Autónoma de Nayarit, ubicada en Xalisco, Nayarit a una altitud de 940 m. El cultivo se desarrolló en un invernadero de 8m de ancho, 42 m de largo y 6.5m de altura, y techo con dos aguas, cubierto con polietileno y ventilación lateral con malla antiáfidos.

5.2. Material genético

El material genético que se utilizó fue el chile tipo húngaro variedad 'Inferno' (Seminis[®]). Es un híbrido muy precoz, de 70 a 75 días a cosecha con producción continua; planta muy vigorosa y productiva que madura de color variado que va desde amarillo al rojo cuando madura completamente. Los frutos son colgantes, pared gruesa, grandes de 20x3.8 cm, lisos y estrechándose hacia la punta.



Figura 2. Chile húngaro (var. Inferno).

5.3. Producción de plantas para trasplante

La producción de plántula se efectuó en charolas de poliuretano de 200 cavidades color blanco previamente desinfectadas. Como sustrato se empleó turba comercial de la marca Sunshine # 3. Antes de saturar el sustrato con agua, se le hicieron pequeñas depresión es para luego sembrar una semilla por cada cavidad. Durante la fase de plántula, se mantuvo un 80% de humedad en el sustrato; la cantidad de agua que se aplicó varió de 0.3 a 1.0 L, y estuvo en función de las condiciones de temperatura, radiación solar y humedad ambiental. Para el control de insectos chupadores se utilizó Confidor ($1.0 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$), y la prevención de enfermedades fungosas en la raíz se realizó mediante el empleo de Previcur ($1.5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$) más Derosal ($1.0 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$).



Figura 3. Producción de chile tipo húngaro para trasplante.

5.4. Diseño experimental

Los tratamientos consistieron de cinco potenciales osmóticos de la solución nutritiva (Cuadro 9), establecidos en un diseño experimental completamente al azar con cinco repeticiones.

Cuadro 9. Composición química de los tratamientos de la solución nutritiva en función del potencial osmótico en el experimento de Chile tipo húngaro (Adaptado de Steiner, 1984).

Potencial Osmótico de la solución nutritiva (MPa)	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	NO ₃	H ₂ PO ₄	SO ₄ ²⁻
	meq L ⁻¹					
-0.018	2.25	1.75	1	3	0.25	1.75
-0.036	4.50	3.50	2	6	0.50	3.50
-0.054	6.75	5.25	3	9	0.75	5.25
-0.072*	9.00	7.00	4	12	1.00	7.00
-0.090	11.25	8.75	5	15	1.25	8.75

Solución estándar*

Las unidades experimentales fueron contenedores de polietileno negro con capacidad de 14 litros. Se prepararon soluciones nutritivas en depósitos de 1,100 L de cada una de las concentraciones utilizadas. El acomodo de los tratamientos con sus respectivas repeticiones se hizo de manera aleatoria. En cada contenedor se estableció una planta.

El experimento consistió en 150 plantas que resultan de 5 tratamientos de la solución nutritiva y 30 repeticiones. La unidad experimental consistió de una maceta que contuvo una planta. Los muestreos se hicieron cada 20 días después del trasplante, y en cada muestreo se consideraron cuatro plantas por tratamiento.

5.5. Solución nutritiva

Se prepararon las soluciones nutritivas de acuerdo al potencial osmótico como se indica en el cuadro 10. Las soluciones nutritivas se suministraron desde el momento del trasplante hasta la cosecha.

Las fuentes de fertilizantes grado fertirriego que se usaron para el suministro de macro nutrientes fueron los siguientes: nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de magnesio, sulfato de potasio, fosfato mono potásico y ácido sulfúrico. Como fuente de micronutrientes se empleó el producto comercial Ultrasol Micro[®] de SQM.

Cuadro 10. Cantidad de fertilizantes para preparar 1100 L de solución nutritiva.

Fuente de fertilizante	Concentración				
	-0.018 MPa	-0.036 MPa	-0.054 MPa	-0.072 MPa	-0.09 MPa
Potencial Osmótico	-0.018 MPa	-0.036 MPa	-0.054 MPa	-0.072 MPa	-0.09 MPa
Porcentaje de la Solución	25%	50%	75%	100%	125%
Nitrato de calcio (g)	292.05	584.10	876.15	1168.20	1460.25
Nitrato de potasio (g)	83.33	166.65	249.98	333.30	416.63
Sulfato de magnesio (g)	135.30	270.60	405.90	541.20	676.50
sulfato de potasio (g)	71.78	143.55	215.33	287.10	358.88
Fosfato mono potásico (g)	37.40	74.80	112.20	149.60	187.00
Ácido sulfúrico concentrado (mL)	25	25	25	25	25
Ultrasol Micro* (g)	40	40	40	40	40

*La composición de Ultrasol Micro[®] es: boro 0.7%; cobre 0.3%; hierro 7.5%; manganeso 3.7%; molibdeno 0.2%; zinc 0.6%.

La aplicación de la solución nutritiva se realizó mediante un sistema de riego por goteo, utilizando cinco depósitos de 1,100 L que suministraron la solución nutritiva mediante válvulas y la distribuyeron a cada planta.

La distancia entre macetas fue de 0.5 m y 1.1 m entre hileras. En cada tratamiento la solución se distribuyó mediante redes de tubería de PVC independientes.

5.6. Establecimiento y conducción del experimento

5.6.1. Trasplante

El trasplante se llevó a cabo el día 7 de septiembre de 2012, cuando las plantas tuvieron seis hojas, aproximadamente 40 días después de la siembra (dds). Se utilizaron contenedores de polietileno de 14 L color negro con orificios en la base para permitir un buen drenaje en caso de un exceso de riego, ya que se empleó un sistema hidropónico abierto. Como sustrato se utilizó el tezontle rojo con granulometría de 1 a 7 mm.



Figura 4. Trasplante de chile tipo 'Húngaro' en las unidades experimentales.

5.6.2. Manejo agronómico

5.6.2.1. Riego

Los riegos se aplicaron en función de la demanda hídrica de la planta, manteniendo el sustrato siempre a una humedad constante (capacidad de contenedor). El suministro del agua varió de acuerdo a la edad de la planta. Las plantas se regaron dos veces al día, en la mañana y en la tarde. La cantidad de agua suministrada estuvo en función del monitoreo diario del drenado, procurando que siempre hubiera un drenado aproximadamente del 30 % de la solución nutritiva suministrada (Ojodeagua *et al.*, 2008), esto con el fin de no salinizar el

sustrato. Para la aplicación del riego se utilizó un sistema de riego por goteo con capilares, regulándolos con un temporizador, con una duración de 5 minutos por riego según el requerimiento diario del cultivo.

5.6.2.2. Podas y tutoreo

Se eliminaron hojas y pequeños brotes anteriores a la primera bifurcación a los 37 ddt, de los cuales se registró la materia seca. A los 25 ddt fue colocado el sistema de tutoreo, el cual consistió en colocar estacas de madera en paralelo a cada 2 metros de distancia a lo largo de las camas de cultivo. Posteriormente, se colocaron hilos de rafia en forma longitudinal a cada 20 cm de separación entre ellos, con el propósito de que las plantas de chile quedaran sujetadas por ambos lados.



Figura 5. Tutoreo de plantas de chile tipo Húngaro.

5.6.3. Variables evaluadas

5.6.3.1. Altura de planta (cm).

La medición de altura de planta comenzó a los 20 días después del trasplante (ddt) y esto se continuó cada 20 días, hasta el momento de la cosecha. Se midió

desde la base del tallo a nivel de la superficie del tezontle en la maceta, hasta el ápice más alto de los brotes en la planta.

5.6.3.2. Número de frutos por planta

La cuantificación de frutos por planta se realizó a partir del cuarto muestreo a los 80 ddt y continuaron hasta el séptimo muestreo a los 140 ddt; se contabilizaron los frutos comerciales (frutos > 15 cm de longitud), no comerciales (frutos < 15 cm de longitud) y los frutos inmaduros.

5.6.3.3. Producción total de frutos por planta (g-planta^{-1})

Se registró el peso total de frutos frescos y secos (frutos comerciales, no comerciales e inmaduros) en el séptimo muestreo.

5.6.3.4. Índice de cosecha biológico (g-g^{-1})

El valor de índice de cosecha biológico se calculó a partir de la relación del peso de la biomasa seca acumulada en frutos cosechados, dividido entre el peso de la biomasa aérea seca total acumulada.

5.6.3.5. Biomasa seca aérea acumulada (g-planta^{-1})

Durante el periodo del primer al tercer muestreo, se cuantificó el peso seco total de la planta sin separar los diferentes órganos; y a partir del cuarto muestreo se obtuvo el peso seco de cada uno de los órganos de la planta por separado. Se registró el peso total de frutos, peso de frutos comerciales, peso de frutos no comerciales, peso de frutos inmaduros, peso de tallo, peso de hoja y peso de flor. El material vegetal se secó mediante una estufa de secado de aire forzado a 70 °C, durante 72 horas hasta llegar a peso constante. La cuantificación de peso fresco y seco se realizó mediante una balanza digital marca Escali, modelo A115B, con capacidad de 11 lb (5 kg).

5.6.3.6. Concentración nutrimental foliar (%)

El muestreo de hojas se realizó cada 20 días apartir del cuarto muestreo a los 80 ddt hasta el séptimo muestreo a los 140 ddt, colectando la hoja recientemente madura. Se determinó el contenido total de N, por el método semi-microkjeldahl, P por colorimetría, K por flamometría y Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn por espectrometría de absorción atómica según los métodos propuestos por (Alcantar y Sandoval, 1999).

5.6.3.7. Concentración nutrimental en la biomasa aérea (%)

Se determinó el contenido nutrimental de macro y micronutrientes en hojas, tallo y frutos en cada uno de los muestreos realizados. A partir de esto, se calculó, la concentración nutrimental en la biomasa aérea, expresado en porcentaje.

5.6.3.8. Extracción nutrimental en la biomasa aérea (g-planta⁻¹)

Se calculó la extracción de los nutrientes a partir del contenido nutrimental en la biomasa seca aérea (tallo, fruto y hoja) y la biomasa seca aérea.

5.7. Análisis estadístico

Los datos de cada variable fueron procesados mediante análisis de varianza y comparación de medias utilizando la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) con el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Altura de planta

Con respecto a la altura de planta, no hubo diferencias estadísticamente significativas. A medida que se hizo más negativo el potencial osmótico en la solución nutritiva, la altura de planta se incrementó hasta llegar al punto más alto de potencial osmótico de -0.054 MPa para luego empezar a disminuir la altura de las plantas. La altura de planta en los diferentes tratamientos varió de 69 a 72 cm.

6.2. Número de frutos por planta

En la variable número de frutos por planta, existieron diferencias estadísticamente significativas para el tratamiento de -0.018 MPa de potencial osmótico con respecto a los demás tratamientos (Cuadro 11). En este tratamiento ocurrió la menor producción de frutos por planta, con una media de 50.8 frutos. El máximo valor alcanzado fue 95.8 frutos-planta⁻¹ para los tratamientos de -0.036 y -0.054 MPa, pero sin diferencias estadísticas con respecto a las plantas cultivadas en condiciones de -0.072 y -0.090 MPa, con valores de 89.7 y 89.3 frutos por planta, respectivamente.

6.3. Producción total de frutos frescos por planta (g-planta⁻¹)

La producción de biomasa en frutos frescos por planta varió en los diferentes tratamientos de 2581 a 3511g.planta⁻¹. El menor valor se obtuvo con el tratamiento de -0.018 MPa y el máximo con -0.054 MPa. En el intervalo de -0.036 a -0.090 MPa no se detectaron diferencias significativas en la producción de frutos por planta. Los resultados obtenidos en esta variable, fue similar a la tendencia observada para la variable número de frutos por planta.

Cuadro 11. Efecto del potencial osmótico de la solución nutritiva en la producción de materia seca, número de frutos, producción de frutos por planta e índice de cosecha en el cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) tipo húngaro, a los 140 ddt.

Ψ_0	MSTA		NFP		Producción de frutos frescos		IC	
(MPa)	g planta ⁻¹		Frutos planta ⁻¹		g planta ⁻¹		g g ⁻¹	
-0.018	232.2	b	50.8	b	2581	b	0.47	c
-0.036	373.0	ab	95.8	a	3423	a	0.51	abc
-0.054	426.3	a	95.8	a	3511	a	0.57	a
-0.072	409.9	a	89.7	a	3366	a	0.54	ab
-0.090	357.8	ab	89.3	a	3280	a	0.51	abc
CV	18.13		13.4		17.18		3.54	
DMS	142.5		24.6		73.14		0.04	

PO: Potencial osmótico de la solución nutritiva; MSTa: Materia seca aérea total acumulada; NFP: Número de frutos por planta. IC: Índice de cosecha. DMS: Diferencia mínima significativa; CV: Coeficiente de Variación. Valores que comparten la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, α 0.05).

6.4. Materia seca aérea total acumulada

A los 140 días después del trasplante, en el tratamiento de potencial osmótico con -0.054 MPa se obtuvo la mayor cantidad de biomasa seca aérea total acumulada, con 426 g.planta⁻¹. Sin embargo no difirió de manera significativa con lo obtenido en los tratamientos de -0.036, -0.072 y -0.090 MPa. La menor cantidad de biomasa seca acumulada, se obtuvo con -0.018 MPa con una media de 232.2 g.planta⁻¹. En el intervalo de -0.018 a -0.054, existe una clara tendencia en la biomasa seca aérea a incrementarse en forma significativa. A medida que se incrementó la concentración de la solución nutritiva con potenciales menores a -0.054 MPa, disminuyó la cantidad de biomasa seca acumulada en la planta, sin diferencias estadísticas.

Durante los primeros 60 ddt, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos para la variable biomasa seca total acumulada (datos no mostrados) en el intervalo de -0.036 a -0.090 MPa. A partir de esto, es posible deducir que en cultivo hidropónico de chile húngaro, es factible aplicar, durante los primeros 60

ddt, solución nutritiva con potencial osmótico de -0.036 MPa y durante el resto del ciclo, aplicar solución nutritiva con -0.054 MPa, lo que concuerda con lo reportado por Bautista (2010), para chile manzano. En esas condiciones, la planta produjo alrededor de 3.5 kg de fruto, superando a todos los demás tratamientos (Cuadro 11). Además, desde el punto de vista económico y ecológico, es conveniente el empleo de soluciones nutritivas con menor concentración de nutrimentos, pues disminuye tanto el costo económico como el riesgo de liberar al ambiente excedente de sales, sobre todo cuando se emplea sistema hidropónico abierto (Castro *et al.*, 2004).

6.5. Índice de cosecha ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

El valor de índice de cosecha obtenido, osciló de un valor mínimo de 0.47 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ para -0.018 MPa a un máximo de 0.57 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ obtenido con el tratamiento de -0.054 MPa (Cuadro 11). Ambos con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias. Al disminuir el potencial osmótico de -0.036 a -0.090 MPa, lo cual implica una mayor concentración de la solución nutritiva, el índice de cosecha no varió en forma significativa. Los datos obtenidos en los diversos tratamientos permiten afirmar, que la cantidad de biomasa acumulada en frutos de chile húngaro representa entre el 47 y 57% del total de biomasa seca acumulada en la parte aérea, lo cual implica una demanda metabólica importante en el ciclo del cultivo.

Mediante el valor de índice de cosecha es posible calcular la cantidad de biomasa acumulada en diferentes escenarios de rendimiento del cultivo de chile tipo húngaro, y asociado con el contenido de nutrientes en la materia seca total, permite estimar la demanda nutrimental de acuerdo a la meta de rendimiento en una condición agroclimática. Por lo tanto, resulta una herramienta útil para establecer programas nutrimentales de fertirriego a través del tiempo.

6.6. Concentración nutrimental foliar

6.6.1. Macro nutrimentos

6.6.1.1. Nitrógeno

Se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos de potencial osmótico para la variable concentración de N en hojas (Cuadro 12). Las plantas que se desarrollaron en la solución nutritiva con -0.018 y -0.036 MPa mostraron valores inferiores a los otros tres tratamientos, sin embargo, en los cinco niveles de Ψ_0 , se muestran incrementos en la concentración foliar de N inversamente proporcionales al Ψ_0 , es decir, que conforme se hace más negativo el Ψ_0 , aumenta la concentración de N en las hojas. En los tratamientos de -0.018 a -0.072 MPa, osciló de 3.66 a 3.94% de N sin diferencias estadísticas. Asimismo, el máximo valor determinado de N foliar se obtuvo con el tratamiento de -0.090 MPa, pero no difirió significativamente de -0.054 y -0.072 MPa.

El incremento en la concentración foliar de N al variar el potencial osmótico, puede explicarse en razón de que al disminuir el potencial osmótico, se incrementó la concentración de N-NO_3^- en la solución nutritiva desde 3 meq·L⁻¹ con -0.018 MPa a 15 meq·L⁻¹ con -0.090 MPa y esto promovió una mayor acumulación de N foliar.

En general, se observan adecuados niveles de N en el contenido de las hojas de las plantas (Cuadro 12), en todos los niveles de Ψ_0 , y concuerda con lo reportado por Campbell (2009) y Jones *et al.* (1991) quienes encontraron niveles de suficiencia entre 3.0 y 5.0% en chile pimiento.

Cuadro 12. Concentración de macro nutrientes en hojas al momento de la cosecha en relación a cinco niveles de Ψ_0 de la solución nutritiva, en chile tipo húngaro.

Potencial Osmótico (MPa)	N	P	K	Ca	Mg
	-----%-----				
-0.018 MPa	3.668 b	0.409 a	5.952 a	1.686 a	0.234 a
-0.036 MPa	3.642 b	0.407 a	6.406 a	1.677 a	0.248 a
-0.054 MPa	3.854 ba	0.412 a	6.319 a	1.724 a	0.267 a
-0.072 MPa	3.943 ba	0.414 a	5.918 a	1.684 a	0.232 a
-0.090MPa	4.298 a	0.422 a	6.476 a	1.567 a	0.189 a
DMS	0.5	0.1	1.0	0.2	0.1
CV	6.0	9.4	7.2	4.3	28.0

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales. Con $\alpha = 0.05$; DMS = diferencia media significativa; CV = Coeficiente de variación

6.6.1.2. Fósforo

La concentración de P en hojas con respecto a los niveles de Ψ_0 , no mostró diferencias significativas (Cuadro 12). El P en todos los niveles de Ψ_0 , estuvo en un adecuado intervalo de suficiencia en las hojas, esto indica que no hubo antagonismos con otros nutrientes. Las concentraciones de P son adecuadas, comparadas con los resultados de Campbell (2009); Jones *et al.* (1991) quienes encontraron niveles adecuados entre 0.3 y 1.0% para chile pimienta.

6.6.1.3. Potasio

La concentración foliar de K en chile húngaro en respuesta a los niveles de Ψ_0 , no mostró diferencias significativas.

Como se observa en el Cuadro 12, los valores de K en hojas de las plantas cultivadas en diferentes tratamientos de Ψ_0 , fueron altos, y superaron al intervalo de suficiencia mencionados por Campbell, (2009), Cadahia (2005) y Jones *et al.* (1991) y entre 4.0 y 5.5% en el cultivo de chile pimienta. No obstante, son dos

especies diferentes y ambas responden de manera distinta a las condiciones agroambientales y nutrimentales (Terbe *et al.*, 2006).

6.6.1.4. Calcio

La mayor concentración de Ca en hojas se observó con el nivel de Ψ_o de -0.054 MPa, de ahí en adelante, fue decreciendo su concentración conforme disminuyó el Ψ_o . Entre todos ellos, el nivel de Ψ_o que mostró ser menos eficiente para la absorción de Ca por la planta fue el de -0.09 MPa, pero sin diferencias significativas con el resto de los tratamientos (Cuadro 12).

Los niveles de Ca foliar encontrados en este estudio, oscilaron de 1.5 hasta 1.7%. Durante el experimento, en ningún caso se mostraron problemas visuales en hojas o de pudrición apical en los frutos, asociado con una insuficiencia de calcio. Por su parte, Cadahia, (2005), encontró para chile pimiento niveles de suficiencia entre 1.9 y 6%. Campbell (2009) reportó en pimiento morrón, que el nivel de suficiencia de calcio oscila entre 0.9 a 1.5%.

Bautista, (2010) desarrolló un experimento factorial en condiciones de hidroponía y evaluó 5 niveles de Ψ_o : -0.036, -0.054, -0.072, -0.09 y -0.108 MPa, y dos variedades: Puebla y Zongolica de chile manzano, encontrando que la concentración de Ca en hojas disminuyó directamente proporcional al decrecer el Ψ_o , ya que el mayor contenido se observó en los tratamientos donde se aplicó -0.036 MPa siendo estadísticamente superiores a los tratamientos con -0.054 y -0.072 MPa; y entre todos ellos el nivel de Ψ_o que mostró ser menos eficiente en la absorción de Ca fue el de -0.09 MPa, seguido por -0.108 MPa.

6.6.1.5. Magnesio

En el Cuadro 12, se observa que no existieron diferencias significativas en la concentración foliar de Mg, con una variación de 0.189 a 0.267 %, entre los tratamientos de Ψ_o . El valor más bajo en la concentración de Mg en hojas se obtuvo con el menor potencial osmótico (-0.09 MPa).

Los valores de suficiencia para pimiento morrón en hojas normales van de 0.3 a 0.5% de acuerdo a lo que estableció Campbell (2009); sin embargo Cadahia (2005) reportó para Chile pimiento valores de suficiencia que van desde 1.0 a 1.7% de concentración en hojas, lo cual indica que el comportamiento del Chile tipo húngaro es diferente, pues las concentraciones de Mg en hojas fueron menores a estas concentraciones y no estuvo asociado a síntomas visuales de deficiencia.

6.7. Concentraciones foliares de macronutrientes a través del tiempo

Las concentraciones en biomasa aérea de macronutrientes a través del tiempo, solo se determinó en las plantas de Chile húngaro del tratamiento con -0.054 MPa, por haberse considerado el mejor tratamiento al promover un adecuado crecimiento, desarrollo vegetal y máxima producción de frutos frescos. Hubo un efecto de dilución en todos los nutrientes, a excepción del Ca, el cual presentó una tendencia acumulativa (Cuadro 13).

Cuadro 13. Contenido de macronutrientes en plantas de Chile húngaro en siete fechas de muestreo, establecidas en solución nutritiva con -0.054 MPa de potencia osmótica.

Nutriente	Días después del trasplante (ddt)						
	20	40	60	80	100	120	140
N	5.500	4.515	3.588	2.989	2.647	2.572	2.596
P	0.400	0.336	0.438	0.470	0.424	0.409	0.309
K	8.130	8.569	7.014	5.453	4.380	4.595	3.493
Ca	0.786	0.951	0.974	0.690	0.440	0.630	0.790
Mg	0.292	0.207	0.253	0.147	0.103	0.121	0.133

El efecto de dilución se observó a partir de los 20 ddt con todos los elementos a excepción del Ca, lo que puede significar que como el Ca es un elemento poco móvil a comparación del N para la planta su concentración fue incrementándose gradualmente ya que una de sus funciones es regular la absorción y contrarrestar los efectos perjudiciales de la acumulación de otros elementos como el K, Na o Mg, además de participar en el almacenamiento y firmeza de frutos (Alcantar y Trejo, 2006). Para el caso del N el comportamiento es debido a que es

esencial en la división y expansión celular, y crecimiento de estructuras vegetativas, como tallos y hojas, principalmente (Barker y Pilbeam, 2006).

En el caso de P, K y Mg se volvió a dar este fenómeno de dilución esto corresponde a una fase intensa de crecimiento, desarrollo y diferenciación celular, que es cuando se traslapan las fases de desarrollo del cultivo. Asimismo tallos, hojas jóvenes y puntos de crecimiento se encuentran en activo crecimiento y contienen altas cantidades de P orgánico en forma de ácidos nucleicos y fosfolípidos. El potasio funciona como activador o cofactor de más de 50 enzimas (cianasas y oxidoreductasas) del metabolismo de carbohidratos y proteínas es por eso que se necesita mucho en el metabolismo de las plantas (Alcantar y Trejo, 2006).

En relación a Mg, la mayor absorción de Mg se da en las hojas, que es en donde se sintetiza gran cantidad de clorofila y otros pigmentos. De 15 a 30 % del total de magnesio en las plantas está asociado con la molécula de clorofila, el otro 70 ó 85 % está asociado como cofactor en varios procesos enzimáticos, fotosíntesis y respiración, la asimilación de carbono y transformaciones de energía (Mengel *et al.*, 2001).

Otro aspecto que influye en la disminución de la concentración de elementos en el tejido es que después de la mitad del ciclo de cultivo se cosecharon frutos, que implica pérdidas de elementos del sistema planta. Adicionalmente, la magnitud de los contenidos totales de nutrimentos en la planta, obtenidos en los muestreos (Cuadro 13), pueden ser utilizados directamente como criterios para establecer niveles críticos y rangos de concentración con propósitos de diagnóstico (Westerman, 1990).

6.8. Micronutrientos

Las concentraciones foliares de micronutrientos en chile húngaro no varió de manera significativa para el caso de Fe, Zn y Cu en los tratamientos de potencial osmótico. La concentración de Mn en hojas fue mayor en los tratamientos de -0.054, -0.072 y -0.090, pero sin diferencias significativas entre ellos (Cuadro 14).

En virtud de que las concentraciones de micronutrientos suministradas en las soluciones nutritivas de los tratamientos de potencial osmótico fue similar en todos los casos, el incremento en la concentración foliar de Mn pudo deberse a las aplicaciones de productos fungicidas en cuya composición está el Mn en cantidades considerables.

Cuadro 14. Concentración de micro nutrientes en relación a cinco niveles de Ψ_o , en el estudio requerimiento nutricional de chile tipo húngaro.

Potencial Osmótico (MPa)	Fe	Zn	Cu	Mn
	-----mg·kg ⁻¹ -----			
-0.018	57.6 a	48.0 a	74.6 a	154.2b
-0.036	69.8 a	41.9 a	59.6 a	147.5b
-0.054	61.2 a	44.3 a	73.9 a	212.5ba
-0.072	56.3 a	46.5 a	72.2 a	231.3 a
-0.090	60.5 a	44.0 a	73.0 a	185.3ba
DMS	22.3	18.2	9.5	65.6
CV	16.7	11.8	9.6	16.1

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales. Con $\alpha = 0.05$; DMS = diferencia media significativa; CV = Coeficiente de variación

Se encontraron concentraciones de Fe entre 56.3 y 69.8 mg·kg⁻¹; estos valores se ubican dentro de la suficiencia que establece Campbell (2009) de 30 a 150 mg kg⁻¹ para pimiento morrón.

Los niveles de suficiencia para el caso de Zn (Cuadro 14) coinciden con los reportados por Campbell, (2009) para pimiento morrón, valores entre 25 y 80 mg·kg⁻¹ y Cadahia (2005) en Chile pimiento con valores entre 25 y 60 mg·kg⁻¹.

Los niveles de suficiencia para el caso de Cu están entre 6 y 25 mg·kg⁻¹ los cuales no están entre los rangos de suficiencia establecidos por Campbell, (2009) Mills y Jones (1996) y Cadahia (2005). Lo que sugiere que la acumulación del Cu fue en exceso debido a la aplicación foliar con productos cúpricos anticriptogámicos que constituyen una fuente considerable de error en caso de que no se tomen las precauciones necesarias en el muestreo y en el lavado de las hojas (Humphries *et al.*, 2007).

Los fungicidas pueden presentar cantidades no despreciables de microelementos relativamente asimilables por los cultivos (Humphries *et al.*, 2007), incluso pueden prevenir y corregir problemas de deficiencias en algunos de ellos, sobre todo en el caso del cobre, donde los tratamientos fúngicos aportan cantidades de este elemento muy superiores a las necesidades de los cultivos y acarrear problemas de toxicidad. En el manejo del cultivo, se aplicaron productos a base de manganeso y cobre durante el desbrote y deshoje de las plantas para prevenir ataques fúngicos, lo que explicaría los valores tan altos de estos elementos detectados en los cultivos, que en ningún momento pusieron en evidencia signos de toxicidad.

6.9. Concentraciones foliares de micronutrientes a través del tiempo

Para el caso de las concentraciones foliares de microelementos en plantas de Chile húngaro, al igual que lo ocurrido para los elementos mayores, se marcaron dos fases (Cuadro 15). La primera que comprende del inicio del trasplante hasta los 60 ddt, y la segunda de los 60 a los 140 ddt; para la primera fase hubo un

efecto de dilución para todos los microelementos ya que a medida que transcurrió el desarrollo de la planta, la concentración del nutriente en el tejido disminuyó, al igual que lo ocurrido para N, P, K y Mg. En la siguiente fase, el efecto de dilución solamente sucedió para los elementos, Fe y Cu.

El hierro interviene en funciones vitales en el metabolismo de la planta formando parte de sistemas enzimáticos, al ser un componente metálico de algunas enzimas. El Cu es requerido en muy bajas cantidades por la planta y este se encuentra asociado a muchas enzimas ya sea como activador o formando parte de su grupo prostético (Alcantar y Trejo, 2006). Sin embargo, debido a la aplicación de productos a base de Cu, su concentración en la planta aumentó en los primeros muestreos; sin embargo, este fue disminuyendo conforme pasó el tiempo también debido a que se fueron utilizando menos productos fungicidas a base de Cu (Humphries *et al.*, 2007).

Para el caso de Zn y Mn, su comportamiento fue igual que el Ca, su concentración fue en aumento a partir de los 60 ddt debido a que son elementos poco móviles en la planta e interviene en procesos enzimáticos en el metabolismo de las plantas de Chile (Alcantar y Trejo, 2006).

Cuadro 15. Concentración foliar de micronutrientes en plantas de Chile húngaro en siete fechas de muestreo, establecidas en solución nutritiva con -0.054 MPa de potencial osmótico.

Nutriente	Días después del trasplante (ddt)						
	20	40	60	80	100	120	140
	mg·kg ⁻¹						
Fe	53	48	43	62	66	67	61
Zn	38	30	32	58	58	64	74
Cu	76	32	52	69	69	56	44
Mn	74	44	47	136	130	168	212

6.10. Correlaciones entre variables

Cuando se compara la relación que existe entre dos variables y/o factores se dice que existe correlación cuando se tiene influencia en la otra. Existe correlación negativa cuando la concentración de alguna variable se incrementa y la otra con que se está comparando disminuye; para las correlaciones positivas, conforme una variable y/o factor incrementa, la otra variable también incrementa.

Las correlaciones que se describen a continuación, son solo las que fueron significativas estadísticamente. Existió una correlación negativa entre el potencial osmótico y la concentración de nitrógeno en la biomasa aérea; a su vez, se encontró correlación positiva entre N y P, así como correlación negativa entre P y Ca (Cuadro 16).

Cuadro 16. Correlaciones entre macronutrientes en plantas de chile húngaro

	PO	N	P	K	Ca	Mg
PO	1	-0.92798	-0.70711	-0.34278	0.6636	0.44073
	-	*0.0229	0.1817	0.5723	0.222	0.4576
N	-	1	0.88332	0.35522	-0.81417	-0.6207
	-	-	*0.047	0.5574	0.0934	0.2639
P	-	-	1	0.5613	-0.95803	-0.41271
	-	-	-	0.3249	*0.0103	0.4898
K	-	-	-	1	-0.45793	0.35715
	-	-	-	-	0.438	0.5551
Ca	-	-	-	-	1	0.31223
	-	-	-	-	-	0.609
Mg	-	-	-	-	-	1
	-	-	-	-	-	-

*Con diferencias significativas

6.11. Extracción nutrimental en la biomasa aérea (g-planta⁻¹)

La extracción de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn en las plantas de chile húngaro, siguió la tendencia de la acumulación de materia seca (Figura 5). En orden decreciente la extracción de nutrientes fue K>N>Ca>P>Mg>Mn>Fe>Cu>Zn (Cuadro 17). El K fue el nutriente extraído en mayor magnitud (Cuadro 17).

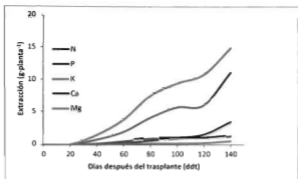
debido a los procesos de formación y crecimiento de frutos, los cuales llegan a constituir el principal órgano de demanda, con valores de 70 a 80 % de la cantidad total extraída por la planta (Bugarin *et al.*, 2002). El segundo nutrimento extraído en mayor cantidad fue el N, esto se debe a que en el tejido verde, las proteínas representan de 80 a 85 %, los ácidos nucleicos 10 % y el amino soluble 5 % (Mengel *et al.*, 2001), en los cloroplastos de las células foliares, 75 % del nitrógeno orgánico se encuentra como proteínas enzimáticas (Marschner, 2012).

Con los datos de contenido y con el rendimiento de la planta se calculó, la cantidad de nutrimento necesario para producir una tonelada de fruto (Cuadro 17). Para obtener estos índices de extracción nutrimental se tomó como referencia la cantidad de materia seca acumulada en los frutos comerciales, ya que si se toma como referencia la cantidad de biomasa total en los frutos comerciales más los no comerciales, se subestiman los índices de extracción nutrimental (Cuadro 11). Esta información permitirá contar con elementos para diseñar programas de fertilización en campo abierto, ya que al conocer el índice de extracción nutrimental (IEN) del cultivo (Cuadro 17), junto con el valor de rendimiento esperado, será posible calcular la demanda nutrimental del cultivo; es decir, las unidades de nutrimentos (en Kg-ha⁻¹) que la planta debe extraer del suelo e incorporar a sus tejidos para alcanzar el rendimiento esperado (Castro *et al.*, 2004).

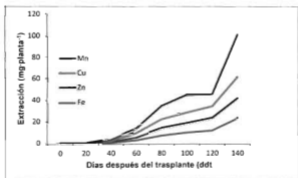
Cuadro 17. Extracción de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn en el cultivo de chile húngaro (*Capsicum annuum* L.). Xalisco, Nayarit, 2013.

Concepto	Unidad de medida	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
*IEN	kg t ⁻¹	3.1	0.37	4.2	0.97	0.2				
	g t ⁻¹						6.7	5.1	5.6	11.2
Absorción Nutrimental	g planta ⁻¹	11.0	1.3	14.9	3.4	0.6				
Acumulada	mg planta ⁻¹						23.5	18.1	19.9	39.4

*IEN: Índice de extracción nutrimental.



a)



b)

Figura 6. Curvas de extracción acumulada de macronutrientes (a) y micronutrientes (b) en plantas de chile tipo hungaro durante un ciclo de cultivo. Xalisco, Nayarit

En los sistemas convencionales de producción ocurre que al inicio del ciclo de cultivo se aplican cantidades significativas de fertilizante, que puede fluctuar entre una tercera parte y la mitad de la dosis de fertilización; sin embargo, se observa que no es recomendable aplicar altas cantidades de nutrientes en la etapa inicial de desarrollo del cultivo, debido a que una proporción importante de nutrientes quedará fuera del alcance del sistema de raíces de la planta, ya que la cantidad extraída y la velocidad de extracción de los nutrientes, en la etapa inicial de desarrollo es baja (Figura 6).

7. CONCLUSIONES

El potencial osmótico de la solución nutritiva, en el intervalo de -0.018 a -0.09 MPa, generó una respuesta diferencial en el crecimiento, producción y concentración de macro y micronutrientes a través de las etapas fenológicas del cultivo de chile tipo húngaro.

La solución nutritiva con el Ψ_o de -0.054 MPa, promovió en plantas de chile húngaro, la mayor acumulación de biomasa aérea a los 140 ddt (426.3 g.planta⁻¹), así como también la producción más alta de frutos frescos, número de frutos por planta e índice de cosecha biológico (0.57 g.g⁻¹).

Durante el periodo de las fases fenológicas vegetativa hasta inicio de floración, se obtuvo un adecuado crecimiento y nutrición de las plantas de chile húngaro con soluciones nutritivas, cuyo potencial osmótico varió de -0.018 hasta -0.036 MPa. Sin embargo, a partir de allí hasta finalizar el cultivo, se sugiere emplear una solución con -0.054 MPa, en virtud de que con este tratamiento se logró la mayor producción y una calidad aceptable de frutos.

Los valores de los índices de extracción nutrimental calculados y que pueden emplearse para determinar la demanda nutrimental del cultivo de chile húngaro de acuerdo a una meta de rendimiento son los siguientes, en kg t⁻¹ de producto cosechado: 3.1 N, 0.4 P, 4.2 K, 1.0 Ca, 0.2 Mg. Para micronutrientes (en g t⁻¹ de producto cosechado): 6.7 Fe, 5.1 Zn, 5.6 Cu y 11.2 Mn.

Las concentraciones nutrimentales foliares determinadas en hojas recientemente maduras de plantas cultivadas con un potencial osmótico de -0.054 MPa, proveen valores de referencia con fines de diagnóstico nutrimental.

8. REFERENCIAS

- Abad B. M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. In: M. Urrestarazu G. Tratado de cultivo sin suelo. 3ª Edición. Edit. Mundi-Prensa. 914 p.
- Adams, P. and L.C. Ho. 1992. The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. *J. Hort. Sci.* 67: 827-839.
- Agrolinz. Műtrágyázási kézikönyv. 2003. Agrolinz Magyarország Kft. Bud apest.
- Alcántar, G. G.; Sandoval, V. M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México. 155 p.
- Alcántar G. G y Trejo T.L. I. 2006. Nutrición de cultivos. Ediciones Mundi-Prensa. 462 p.
- Alpi, A.; F. Tognoni. 1991. Cultivo en invernadero. 3a edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 347 p.
- Amberger, A. 1993. Efficient management of nitrogen fertilization in modern cropping systems, pp. 619-622. In: Optimization of Plant Nutrition. Frago, M.A.C.; VAN Beusichem, M. L. (eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.
- Asher, C.J., and D.G. Edwards. 1983. Modern solution cultura techniques. pp. 94-119. In: A. Pirson, and M.H. Zimmermann (Ed.). Encyclopedia of Plant Physiology. Vol. 15-A. Springer-Verlag, Berlin.
- Azofeifa A., y Moreira M. 2004. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. hot) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 32: 19-29.
- Azofeifa A., y Moreira M. 2005. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile dulce (*Capsicum annuum* CV. UCR 589) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 29: 77-84.
- Barker, A. V.; Pilbeam, D. J. 2006. Handbook of plant nutrition. CRC Press. Boca Raton Fla. USA, 613 p.
- Bautista C., T. 2010. Potencial osmótico en la absorción nutrimental y calidad de fruto en chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.). Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 93 p.
- Baixaui S. C. y Aguilar O. M. 2002. Cultivo sin Suelo de Hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias. Serie de divulgación técnica. Valencia, España. 110 p.
- Bar-Tal A, Aloni B, Karni L, and Rosenberg R. Nitrogen Nutrition of Greenhouse Pepper. II. Effects of Nitrogen Concentration and NO₃: NH₄ Ratio on Growth, Transpiration, and Nutrient Uptake. *Hortscience* 2001. 36:1252-1259.
- Bugarin, M. R., A. Galvis S., P. Sanchez G.; D. Garcia P. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra*. 20: 391-399.
- Cadahia Carlos. 2005. Fertirrigación: cultivos horticolas, frutales y orñamentales. Mundi-prensa. 681 p.

- Campbell, C.R. 2009. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. 122 p. Disponible en: <http://www.ncagr.gov/agronomi>.
- Castro B. R., Galvis S. A., Sánchez G. P., Peña L. A., Sandoval V. M., Alcántar G. G., 2004. Demanda de nitrógeno en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 10: 147-152.
- Castro B. R., Sánchez G. P., Peña L. A., Alcántar G. G., Baca C. G., López R., R. M. 2000. "Niveles críticos, de suficiencia y toxicidad de N-NO₃ en el extracto celular de peciolas de tomate de cáscara". *Terra Latinoamericana*, num. abril-junio. 18: 141-145.
- Charlo H, Oliveira SF, Vargas PF, Castoldi R, Barbosa JC, Braz LT. 2012. Accumulation of nutrients in sweet peppers cultivated in coconut fiber. *Horticultura Brasileira*. 30: 125-131.
- Csathó, P. & Fodor, N. & Németh, T. & Terbe, I. & Árendás, T. & Marth, P. & Cserni, I. & Takácsné, H. M. & Kapitány, J. & Kruppa, J. & Barnóczki, A. & Varga, I. (2004): Új, költségkímélő és környezetkímélő növényápolási rendszer szántóföldi zöldségnövényekre. Hajtás korai termesztés. 35 (2): 6-7.
- De Pascale S., Raimondi, A. G. Martino and Barbieri, G. 2003. Water relation and abscissic acid content in tomato as affected by osmotic stress. *Acta Hort*. 609: 89-95.
- De Reijck, G. y E. Schrevens. 1998. Cationic speciation in nutrient solutions as a function of pH. *J. Plant Nutr*. 21: 861-870.
- Ehret, D.L. and L.C. Ho. 1986. Effects of osmotic potential in nutrient solution on diurnal growth of tomato fruit. *J. Exp. Bot*. 37: 1294-1302.
- Escalona A. y Pire R. 2008. Crecimiento y extracción de N-P-K por plantas de pimentón (*Capsicum annum* L.) abonadas con estiércol de pollo en Quibor, estado Lara. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 25: 243-260.
- Ezquivel T. S. 2001. Sustratos para el cultivo sin suelo. Tesis de Licenciatura. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx. 112 p.
- Favela, S. E., Preciado, R. P., Benavides, M. A. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila. México. 146 p.
- Fageria, N. K. 2009. *The Nutrient Use of Crop Plants*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Fageria, N. K. 2007. Yield physiology of rice. *Journal of Plant Nutrition*. 30: 843-879.
- Fageria, N. K., V. C. Baligar, and R. B. Clark. 2006. *Physiology of Crop Production*. New York: The Haworth Press.
- Fontes PCR, Dias EN, Graça RN. 2005. Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. *Horticultura Brasileira*. 23: 275-280.
- Galvis S., A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad en Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 327 p.

- Gyürös, J. (2005): Öntözés. In (szerk) Terbe, I., Hodossi, S., Kovács, A.: Zöldszéktesztesztéster mesztőberben dezésekbén. Mezőgazda Kiadó. Budapest.
- Humphries J.M., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. 2007. Copper, pp. 293-328. In: A. Barker y D. Pilbeam (eds.). Handbook of Plant Nutrition. CRC Press.
- Humphries J.M., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. 2007. Molybdenum, pp. 500-514. In: A. Barker y D. Pilbeam (eds.). Handbook of Plant Nutrition. CRC Press.
- Humphries J.M., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. 2007. Manganese, pp. 351-374. In: A. Barker y D. Pilbeam (eds.). Handbook of Plant Nutrition. CRC Press.
- Humphries J.M., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. 2007. Zinc, pp. 411-434. In: A. Barker y D. Pilbeam (eds.). Handbook of Plant Nutrition. CRC Press.
- Jones, JR., J. B., Wolf B., Mills H. A. 1991. Plant Analysis Handbook. Micro-Macro Publishing, Inc. USA. 213 p.
- Kuzjacov, Y.; Rühlmann, J.; Gutezeit, B.; Sélér, B. 1996. Modelling on the growth and N uptake of leek and broccoli. *Acta Horticulturae* 428: 181-191.
- Lara, H. A. 2000. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía; NutrientSolution Management in theHydroponicProduction of Tomato. *Terra Latinoamericana*. 17: 221-229.
- Le Bot, J. S. Adamowicz and P. Robin. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Sci. Hort.* 74: 47-82.
- León G, M. H., y J. J. Martínez T. 2004. Producción de fresa en invernadero. In: Narváez M. G., V. (Ed). *Hidroponía, una nueva cultura agrícola*. Chihuahua, Chihuahua. pp 151-163.
- Loué, A. 1986. Los microelementos en agricultura. Ed. Mundi Prensa. Madrid. 166 p.
- Marschner, P. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Third edition. Elsevier Academic Press, San Diego, CA, USA. 651 p.
- Medina, N. Borges G. J. Soria F. L. 2010. Composición nutrimental de biomasa y tejidos conductores en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 12: 219-228.
- Mengel, K., E. A. Kirkby, H. Kosegarten, T. Appel. 2001. Principles of plant nutrition. 5th ed. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 635 p.
- Milla, A. 1996. Pimientos. *Compendios de Horticultura* 9. Ed. De Horticultura, S. Barcelona, España. 367 p.
- Mills H. A and J. B. Jones. 1996. Plant Analysis Handbook II. Micro-Macro Publishing, Inc. U. S. A. 420 p.
- Muller L. 1961. Un aparato micro-Kjeldahl simple para análisis rutinarios de materiales vegetales. *Turrialba (CR)*. 11: 17-25.
- Munson RD, Nelson WL 1990. Principles and practices in plant analysis. Book Series, *Soil Sci. Soc Am., Madison Wisconsin, USA*. 3: 359-427.
- Namesny, A. 2006. Pimientos. *Compendios de Horticultura* 16. 2da Ed. De Horticultura, Barcelona, España. 254 p.
- Noguera, P., M. Abad, R. Puchades, V. Noguera, A. Maquieira, and J. Martínez. 1997. Physical and chemical properties of coir waste and their relation to plant growth. *Acta Hort.* 517: 279-286.

- Noronha M. F.; Villas B. R.; Grava de G. L.; Goto R. 2004. Macronutrient accumulation and partitioning in fertigated sweet pepper plants. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 61: 62-68.
- Ojodeagua, A. J. L., R. J. Z. Castellanos, R. J. J. Muñoz, G. G. Alcántar, Ch. L. Tijerina, T. P. Vargas, y R. S. Enriquez. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Rev. Fitotec. Mex.* 31: 367-374.
- Péti Nitrokomplex Kft Műtrágyázási tanácsadója (2004). Pétfürdő.
- Pineda-Pineda, Joel, Avitia-García, Edilberto; Castillo-González, Ana Ma. Corona-Torres, Tarsicio; Valdez-Aguilar, Luis Alonso; Gómez-Hernández, Jacinto. 2008. Extracción de macronutrientes en frambueso rojo. *Terra Latinoamericana* 26: 333-340.
- Preciado-Rangel, P., G. A. Baca-Castillo, J. L. Tirado-Torres, Kohashi-Shibata, L. Tijerina-Chávez y A. Martínez-Garza 2003. Presión osmótica de la solución nutritiva y la producción de plántulas de melón. *Terra* 21: 461-470.
- Ramos L. C., Alcántar G. G., Galvis S. A., Peña L. A., Martínez G. A. 2002. Eficiencia de uso del nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego. *TERRA Latinoamericana*. Chapingo, México. 20: 465-469.
- Resh, H. 2013. *Hydroponic Food Production*. 7th edition. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL, USA. 560 p.
- Rhoades, J. D. 1993. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. pp: 201-251. In: Sparks, D.L (ed). *Advances in Agronomy*.
- Rincón, L.; Saez, J.; Balsalobre, E.; Pellicer, M.C. 1993. Nutrición del pimiento grueso de invernadero. *Hortofruticultura* 5: 37-41.
- Rodríguez S., J. 1990. Fertilización de los Cultivos. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 117 p.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 2003. *Fisiología de las plantas: desarrollo de las plantas y fisiología ambiental*. Thompson Editores Spain, Paraninfo, Madrid. 3: 529-562.
- Salisbury, M. W., T. T. Ross, C. R. Krehbiel, C. L. Schultz, and L. L. Melton. 2004. Effects of protein on intake, nitrogen balance, and site and extent of digestion in whiteface wethers consuming medium-quality grass hay. *J. Anim. Sci.* 82: 3567-3576.
- Sandoval V., M., P. Sánchez G. y G. Alcántar G. 2008. Principios de la hidroponía y del fertirriego. In: G. Alcántar G. y L.I. Trejo-Téllez. (eds) *Nutrición de Cultivos*. Colegio de Postgraduados. Mundi-Prensa. México. pp. 373-438.
- SAS Institute. 2009. SAS software release 6, 12. SAS institute Inc. Cary, N. C., USA. 830 p.
- Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Producción Agrícola por cultivo*. Disponible en línea: <http://www.siap.gob.mx>. Consultado el 26 de Marzo de 2014.
- Sonneveld, C.; Voogt, W. 2009. *Plant nutrition of greenhouse crops*: Springer. London, UK. 446 p.
- Sonneveld, C. 1997. A universal programme for calculation of nutrient solutions. *Proceedings 18th Hydroponic Society of America*. 7-17.

- Stanford, G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in crop production. *Journal of Environmental Quality*, 2: 159-166.
- Steiner A., A. 1984. The universal nutrient solution. In: Sixth International Congress on Soilless Culture. Proceedings International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands pp 633-650.
- Steiner, A.A. 1973. The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. pp. 43-53. In: Proceedings 3rd International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.
- Tapia F. 1994. Evaluación de diferentes sustratos en la producción de plántulas de chile (*Capsicum annum* L) Tesis Profesional. UAA. Xalisco, Nay. México
- Terbe, I., Szabó, Zs. & Kappel, N. 2006. Macronutrient accumulation in green pepper (*Capsicum annum* L.) as affected by different production Technologies. *International Journal of Horticultural Science*. 12: 13-19.
- Terés T. V. 2001. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Departamento de Producción Vegetal. Fitotecnia. Esp. 483 p.
- Trocmé, S. 1970. Influence de la fertilisation et de diverses techniques de culture sur l'alimentation des plantes en oligo-éléments. *Ann. Agron.* 21: 519-548.
- Troeh, FR, y Thompson, LM 2005. Los suelos y la fertilidad del suelo. Ames: Blackwell.
- Universidad Politécnica de Valencia. 2003. Parte III. Tema 12: El Agua en las Plantas. Nutrición y Transporte de Elementos Minerales. Nutrición Mineral [En línea] Disponible: http://www.euita.upv.es/varios/biologia/temas/tema_12.htm (Revisado el 24 de septiembre de 2013).
- Westerman, R. L. 1990. Soil testing and plant analysis. 3rd ed. SSSA Book Ser. 3. SSSA, Madison, WI.
- Taiz, L.; Zeiger E. 2010. Plant Physiology. Fifth Edition. Sinauer Associates Publishers, Sunderland, MA, USA. 782 p.