



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

**PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE LECHUGA CON
Y SIN RECIRCULACIÓN DE SOLUCIÓN
NUTRITIVA**

TESIS

Como requisito parcial para
obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



PRESENTA

JORGE GUTIERREZ TLAHQUE

Chapingo, México. Diciembre de 2011



APROBACIÓN

PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE LECHUGA CON Y

SIN RECIRCULACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

Tesis realizada por **Jorge Gutiérrez Tlahque**, bajo la dirección del **Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez** y del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: _____

Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez

ASESOR: _____

Dr. Felipe Sánchez del Castillo

ASESOR: _____

Dr. Efraín Contreras Magaña

Chapingo, Estado de México, Diciembre de 2011.

::

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la oportunidad de terminar mis estudios de Maestría, a pesar de las pruebas tan difíciles que la vida me ha puesto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría.

Al Instituto de Horticultura en la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de obtener conocimientos muy valiosos, así como por la autorización y facilidades para llevar a cabo el trabajo.

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, por su experiencia, apoyo e invaluable conocimientos, que sin duda enriquecieron la presente investigación.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo, por su asesoramiento y disposición, a favor del presente proyecto.

Al Dr. Efraín Contreras Magaña, por sus revisiones y recomendaciones, que sin duda enriquecieron la presente investigación.

Igualmente quiero agradecer el apoyo invaluable recibido de mis profesores del Instituto de Horticultura que durante mis estudios ampliaron mis conocimientos.

A la C.P. María Elena Hernández Briones y al M.C. Adán Pazaran Fernández por brindarme el apoyo para culminar con mis estudios.

DEDICATORIA

Durante mis estudios siempre tuve el apoyo de las siguientes personas, a quienes dedico el presente trabajo.

A María de los Reyes Michimani Ramírez (†), que me dio siempre su amor, apoyo incondicional y que formo en mí una persona disciplinada y humilde.

A Carmen Yuliana Gutiérrez Juárez, mi hija, que con su amor y cariño en todo momento inspiro mi lucha por ser mejor persona.

A mis Padres María Remedios Tlahque Michimani y Jorge Gutiérrez Contreras que han apoyado en estos momentos tan difíciles.

A Carlos Efraín, María Graciela y José Manuel que me han apoyado para la culminación de mi Maestría.

Sinceramente,
Jorge Gutiérrez Tlahque

DATOS BIOGRÁFICOS

El ingeniero Jorge Gutierrez Tlahque, nació en la ciudad de México, el diez de Junio de 1984. Ingresó al Departamento de Ingeniería Agroindustrial en la Universidad Autónoma Chapingo en el año 2003 obteniendo el título de Ingeniero Agroindustrial en el año 2008 con la tesis: Análisis y marco lógico con su propuesta de mejora para la sociedad de productores de nopal de San Bernardino Tlaxcalancingo Puebla. De Junio de 2007 a Noviembre de 2008 trabajó como Prestador de Servicios Profesionales de la SAGARPA. En enero de 2009 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo, donde realizó estudios de Maestría en Ciencias en Horticultura, en el Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia de la misma Universidad.

CONTENIDO

APROBACIÓN	I
AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	IV
DATOS BIOGRÁFICOS	V
CONTENIDO	VI
LISTA DE CUADROS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos específicos	3
1.2. Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Invernadero	4
2.2. Cultivo sin suelo	4
2.3 Clasificación de los cultivos sin suelo en función del uso drenaje	6
2.4. Cultivo de Lechuga	13
2.4.1. Importancia económica mundial del cultivo de lechuga	13
2.4.2. Descripción Botánica	14
2.4.3. Variedades de Lechuga	15
2.4.4. Valor Nutrimental	15
2.4.5. Factores ambientales que favorecen el desarrollo de lechuga tipo mantequilla.....	16
2.5 Manejo de lechuga en diferentes sistemas hidropónicos bajo condiciones de invernadero	18
2.5.1. Sistema de balsas flotantes	18
2.5.2. Sistema de hidroponía NFT	19
2.5.3. Sistema en sustrato sólido	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Ubicación del sitio experimental.....	21
3.2 Material Vegetal	22
3.3. Sistemas de Producción	22
3.4. Diseño y unidad experimental.....	25
3.5. Manejo del cultivo	26
3.5.1. Semillero	26
3.5.2. Trasplante	27
3.5.3. Riegos.....	27
3.5.4. Control de Plagas y Enfermedades	27
3.5.5. Fertilización.....	28
3.6. Caracteres evaluados	29
3.6.1. Rendimiento y sus componentes	29

3.6.2. Condiciones en la rizosfera.....	30
3.6.3. Condiciones ambientales dentro del invernadero	31
3.6.4 Agua y Nutrientes	34
3.7 Diseño experimental y análisis estadístico	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1. Rendimiento y sus componentes	35
4.2. Comportamiento del pH de la solución nutritiva drenada	44
4.3. Comportamiento de la Conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva lixiviada.....	45
4.4. Temperatura del ambiente de la raíz	48
4.5. Consumo de agua y nutrimentos minerales.....	51
4.5.1. Consumo de Agua	51
4.5.2. Consumo de nutrimentos.....	55
5. CONCLUSIONES.....	58
6. LITERATURA CITADA.....	59

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Situación mundial del cultivo de lechuga en diferentes países y regiones en 2011.....	13
Cuadro 2. Composición nutrimental de los diferentes tipos de lechuga que se comercializan en el mercado en 100 gramos de peso fresco.....	16
Cuadro 3. Soluciones nutritivas propuestas por diversos autores para cultivo de lechuga en sistemas hidropónicos.....	18
Cuadro 4. Composición del agua y solución nutritiva.	28
Cuadro 5. Fuentes de fertilizante usadas para preparar la solución nutritiva.	28
Cuadro 6. Comparación de medias entre tratamientos en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 1.....	36
Cuadro 7. Comparación de medias entre tratamientos en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 2.....	37
Cuadro 8. Comparación de medias entre tratamientos para las variables que se indican en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 1.....	40
Cuadro 9. Comparación de medias entre tratamientos para las variables que se indican en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 2.....	40
Cuadro 10. Patrones de gastos y ahorros de agua para lechuga tipo mantequilla con diferentes sistemas de producción en el ciclo 1.	54
Cuadro 11. Patrones de gastos y ahorros de agua para lechuga tipo mantequilla con diferentes sistemas de producción en el ciclo 2.	54
Cuadro 12. Consumo de Nutrientes para el tratamiento de recirculación de solución nutritiva. Ciclo 1.	56
Cuadro 13. Consumo de Nutrientes para el tratamiento de recirculación de solución nutritiva. Ciclo 2.	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cama de cultivo forrada con plástico negro.....	23
Figura 2. Sistema de abastecimiento de solución nutritiva para los tratamientos T1 y T2.	24
Figura 3. Sistema de abastecimiento de oxígeno en solución nutritiva en el T3.....	25
Figura 4. Distribución y vista general de las unidades experimentales para los tratamientos en el cultivo de lechuga tipo mantequilla.	26
Figura 5. Comportamiento de la temperatura en el invernadero en el ciclo 1 (a) y ciclo 2 (b),	32
Figura 6. Comportamiento de la humedad relativa en el invernadero para ciclo 1 (a) y ciclo 2 (b)	33
Figura 7. Desarrollo de peso fresco (a), peso seco (b) y diámetro de cabeza (c) de plantas de lechuga cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos, en el ciclo 1.	42
Figura 8. Desarrollo de peso fresco (a), peso seco (b) y diámetro de cabeza (c) de plantas de lechuga cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos, en el ciclo 2.	43
Figura 9. Comportamiento del pH en el drenaje a través del tiempo para cultivo de lechuga tipo mantequilla en el ciclo 1 (a) y ciclo 2 (b).....	45
Figura 10. Comportamiento de la CE en el drenaje a través del tiempo para cultivo de lechuga tipo mantequilla en el ciclo 1 (a) y en el ciclo 2 (b).	48
Figura 11. Variación de la temperatura en el sustrato para los tratamientos sin y con recirculación (a), hidroponía profunda (b). Ciclo 1.....	50
Figura 12. Variación de la temperatura en el sustrato para los tratamientos sin y con recirculación (a), hidroponía profunda (b). Ciclo 2.....	51
Figura 13. Consumo de agua por planta en lechuga tipo mantequilla para los tres sistemas hidropónicos. Ciclo 1.....	52
Figura 14. Consumo de agua por planta en lechuga tipo mantequilla para los tres sistemas hidropónicos.Ciclo 2.....	53

RESUMEN

PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE LECHUGA CON Y SIN RECIRCULACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

Con el objetivo de valorar la factibilidad de utilizar sistemas hidropónicos cerrados, que otorguen al menos el mismo rendimiento y calidad que los sistemas hidropónicos abiertos, mediante el acortamiento del ciclo de cultivo de lechuga tipo mantequilla y uso más eficiente del agua y fertilizante, se analizaron variables de crecimiento, rendimiento y aprovechamiento del agua y fertilizantes bajo los siguientes tratamientos: camas rellenas de arena de tezontle rojo sin y con recirculación de la solución nutritiva (T1 y T2, respectivamente) y un sistema de cultivo en balsa o hidroponía profunda (T3). El peso seco, diámetro de cabeza y largo de hojas, fueron mayor en hidroponía profunda. El mayor rendimiento también se presentó en el T3 (7 a 7.3 kg m² en la estación de primavera y verano, respectivamente). El ahorro de fertilizante (K, Ca, N-NO₃⁻ y P) en el sistemas con recirculación de la solución nutritiva (T2) fue de 10.5 % respecto al sistema abierto (T1) y en hidroponía profunda (T3) el ahorro fue de 50 %. Con el T2 se tuvo un ahorro de agua de 20 %, y con el T3, 33 % respecto al T1.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., cultivo sin suelo, raíz flotante, sustrato.

ABSTRACT

HYDROPONIC PRODUCTION OF LETTUCE WITH AND WITHOUT RECIRCULATING NUTRIENT SOLUTION

The objective of this study was to assess the feasibility of using closed hydroponic systems which give at least the same yield and quality as open hydroponic systems by shortening the butter lettuce crop cycle and using water and fertilizer more efficiently. Traits of growth, yield and water and fertilizer use under the following treatments were analyzed: beds filled with tezontle (red volcanic rock) sand with and without recirculating the nutrient solution (T1 and T2, respectively) and a raft or deep hydroponics culture system (T3). Dry weight, head diameter and leaf length were mayor with deep hydroponics. The highest yield also occurred in T3 (7 to 7.3 kg m² in the spring and summer, respectively). Overall savings of fertilizer (K, Ca, NO₃- and N-P) in closed systems (T2) was 10.5 % compared to the open system (T1) and T3 savings was 50 % of fertilizer applied. T2 had a water savings of 20 %, and T3, 33 % with respect of T1.

Keywords: *Lactuca sativa* L., soilless crop production, floating root, substrate.

1. INTRODUCCIÓN

El sector hortícola representa una actividad importante en México (Macías, 2010). En particular la producción de hortalizas con sistemas protegidos sobre todo a base de invernaderos, se ha incrementado notablemente en los últimos años (SIAP, 2010), sistema en el que se cultiva principalmente jitomate, seguido de pimiento y pepino, en una superficie que abarca hasta un 96 % (SIAP, 2009).

La producción de cultivos en invernadero suele acompañarse de tecnología hidropónica, en donde en vez de suelo se usa un sustrato y los fertilizantes se agregan como una solución nutritiva junto con el riego (Sánchez y Escalante, 1988); incluso en este sistema puede o no usarse un sustrato como soporte de las plantas (Urrestarazu, 2004). Con esta tecnología se puede favorecer el ambiente en que se desarrolla la raíz de las plantas y al mismo tiempo se minimizan los problemas que ocasiona un suelo, tales como la incidencia de plagas y enfermedades (Takahashi, 1984; Van, 2009); y cambios desfavorables en sus propiedades físico-químicas (Liang *et al.*, 2006; Blanco ; Folegatti, 2002 y Tüzel *et al.*, 2009).

La producción intensiva de jitomate en invernadero, actualmente ya enfrenta el problema de saturación del mercado, lo que trae como consecuencia disminución del precio del producto y por lo tanto menores beneficios económicos para el productor, por lo que es necesario diversificar las especies que se cultivan bajo este sistema. En esta diversificación, la lechuga (*Lactuca Sativa* L.) representa un cultivo potencial para su producción y manejo, ya que el mercado norteamericano los está demandando (SAGARPA, 2007). En el cultivo de lechuga en México para el

2010, se reportó una superficie de siembra en suelo y a cielo abierto de 188,107 ha, con una producción 3,102,439 toneladas y rendimiento promedio por hectárea de 20 toneladas (SIAP, 2010), rendimiento que podría incrementarse con la tecnología hidropónica.

Los paquetes tecnológicos de producción que se están manejando en México para agricultura protegida consisten en sistemas abiertos, los cuales tienen actualmente el inconveniente de un alto consumo de agua y de fertilizantes. Por un lado el agua es un recurso cada vez más escaso, y por otro, los fertilizantes son cada vez más caros (Huang, 2009). Por lo tanto, para la producción de estos cultivos es necesario considerar que el gasto de agua y fertilizantes es elevado, de tal manera que se hace necesario buscar alternativas de producción para un uso más eficiente de dichos recursos.

Una opción de manejo que se ha practicado en lechuga, es la reutilización de la solución nutritiva, recirculando y colectando la solución para su nueva incorporación como sistema cerrado previa esterilización y ajuste de nutrientes, pH y CE, utilizando un sustrato como soporte. La producción también se puede hacer mediante el uso de un sistema de balsas (hidroponía profunda), en donde la solución nutritiva que se ocupa es solamente aquella que la planta usa para su funcionamiento y crecimiento.

Se ha reportado que la recirculación de la solución nutritiva disminuye el gasto de agua y fertilizantes, a niveles en que se puede obtener un ahorro de hasta un 30 % (Dhakal *et al.*, 2005), además de un menor impacto ambiental al evitar la infiltración de sales minerales que finalmente llegan a ríos y mares (Massa *et al.*, 2010 y Páez *et al.*, 2007).

Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación, fue evaluar la factibilidad de utilizar sistemas hidropónicos cerrados (recirculación de la solución nutritiva e hidroponía profunda) para la producción de lechuga que otorguen al menos el mismo rendimiento y precocidad de cosecha que los sistemas hidropónicos abiertos (sin recirculación).

1.1. Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de recircular la solución nutritiva sobre el crecimiento de plantas de lechuga.
2. Determinar cuánto es el ahorro de agua y elementos nutritivos primarios al recircular la solución nutritiva.
3. Comparar el rendimiento y precocidad de la producción en los sistemas hidropónicos abiertos y cerrados.

1.2. Hipótesis

Con los sistemas de producción con recirculación de la solución nutritiva y en particular con hidroponía profunda, es posible obtener al menos el mismo rendimiento y precocidad que los sistemas abiertos de producción y obtener además, ahorros importantes de agua y nutrimentos minerales.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Invernadero

Castellanos (2000) define al invernadero como el área delimitada por una estructura de madera o metal, recubierta por vidrio o cualquier material plástico de naturaleza transparente, que tiene por objeto reproducir o simular las condiciones más adecuadas de diferentes especies de plantas.

De acuerdo con Castañeda *et al.* (2007) el sistema de producción en invernadero ofrece la ventaja de que establece una barrera entre el medio ambiente externo y el cultivo. Esta barrera crea un microclima que permite protegerlo del viento, granizo, heladas, plagas, enfermedades, hierbas y animales. Esta protección además permite controlar la temperatura, la cantidad de radiación solar, la humedad y hacer un control químico y biológico efectivo para proteger el cultivo, con lo que se puede lograr rendimientos más altos que en el sistema tradicional a campo abierto.

2.2. Cultivo sin suelo

Es un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se riegan con una solución nutritiva (agua con elementos esenciales disueltos), y en donde se utiliza como sustrato un material inerte, o simplemente la misma agua (Sánchez y Escalante, 1988).

Existen diferentes sistemas de cultivo sin suelo, los cuales pueden clasificarse en tres grupos dependiendo en el medio en el que se desarrollan las raíces.

El cultivo aeropónico consiste en mantener las raíces de las plantas suspendidas en aire dentro de una cámara completamente oscura, en la

cual se inyecta solución nutritiva periódicamente con el objetivo de mantener un 100 % de humedad relativa. El suministro de solución nutritiva se realiza mediante una línea de microaspersores alineados estratégicamente y que se encargan de mantener húmeda la raíz mediante descargas de solución nutritiva de corta secuencia (Canavas, 1999).

El cultivo en agua es un sistema en el cual las raíces de una planta están suspendidas en un medio líquido (solución nutritiva que contenga los elementos necesarios), evitando la presencia de luz, ya que de lo contrario en la solución se pueden desarrollar algas que favorecen un cambio en color, reducción de la acidez de la solución, competencia por la toma de nutrientes, menor disponibilidad de oxígeno para la raíz por las noches y por consecuencia un mal funcionamiento de la planta. Mientras que a partir de la corona o cuello radicular, las plantas se mantienen en una capa muy fina de medio inerte que tiene la función de soporte. La incorporación de oxígeno en la raíz se realiza mediante una bomba o compresor que hace que el aire fluya en el interior de la solución nutritiva a través de una tubería con perforaciones (Resh, 1992).

El cultivo en sustrato sólido es un sistema que consiste en utilizar sustratos inertes (tezontle, arena, grava, vermiculita, peat moss, etc.) que le proporcionan a la planta las condiciones necesarias de oxígeno y humedad para su desarrollo. Dentro de los cultivos en sustrato sólido se pueden distinguir tres tipos en función de su manejo. En primer lugar se tienen los sistemas que funcionan por aplicación de una solución nutritiva por subirrigación que se aplica a las camas con grava de un diámetro superior a 3 mm y que fluye rápidamente hacia un depósito. En segundo lugar se

encuentran aquellos sistemas que utilizan un sustrato con baja retención de agua y una elevada aireación, donde el gran tamaño de los poros permiten que el sustrato retenga un mayor volumen de agua; sin embargo, por la baja retención de agua requiere un aporte muy frecuente de solución nutritiva. En tercer lugar están los sistemas que emplean un sustrato como lana de roca, perlita, fibra de coco y arena; con una alta capacidad de retención de agua, donde se maneja una mezcla de partículas con un diámetro de 0.2 a 2.5 mm., de tal forma que requieren un aporte de riegos muy puntual, en función de las necesidades hídricas de un cultivo (Canavas, 1999).

2.3 Clasificación de los cultivos sin suelo en función del uso drenaje

El cultivo sin suelo visto como un sistema, con el manejo de soluciones con los elementos esenciales para la nutrición del cultivo, y el uso más eficiente de agua y fertilizantes en los últimos años ha generado dos conceptos, sistemas abiertos y cerrados.

El sistema abierto permite que la disolución nutritiva sobrante que drena del sistema, percole y se infiltre en el subsuelo o simplemente fluya sobre el suelo fértil o fuera del contenedor de cultivo, sin que el cultivo vuelva a tener ningún contacto con la misma (Urretarazu, 2004). En el sistema abierto es de vital importancia aplicar la cantidad de solución nutritiva que requiere la planta por lo que es necesario llevar un control del drenaje, donde el volumen de mismo debe oscilar en un 20 a 25 % de la capacidad de retención de agua, siempre y cuando el agua sea de buena calidad. El medir el porcentaje de lixiviado permite controlar la acumulación de sales en la rizósfera, de manera que es conveniente acompañarla con la medición del pH y CE, tanto del drenaje como de la solución de aporte (Magan, 1999).

La ventaja de manejar el sistema abierto o sistema de drenaje perdido obedece a que la composición de la solución nutritiva se puede controlar más fácilmente. Si se aplica un plan de nutrición adecuado, los problemas debido a la deficiencia de nutrientes, toxicidades o salinidad son poco probables, como consecuencia de lo anterior se pueden eliminar en forma permanente el exceso de iones; esto genera la posibilidad de utilizar aguas de relativa calidad agronómica, además de que existe una relativa simplicidad en las instalaciones de riego (García, 2007 y Urrestazu, 2004).

Otra de las ventajas de los sistemas abiertos es la disminución de las enfermedades, porque la solución nutritiva fluye de un tanque de almacenamiento hacia la cama de crecimiento y luego la solución que no se retiene por el sustrato se lixivia, por lo que si una planta establecida en una maceta o cama presenta una enfermedad, la solución del drenaje se desecha sin el riesgo de contaminar a las demás (Ikeda *et al.*, 2002).

En los sistemas abiertos de cultivo sin suelo una de las desventajas es que la fracción de drenaje debe mantenerse a un mínimo (Savvas *et al.*, 2007). Lo anterior se debe a que en este tipo de sistemas exige una importante fuga de agua y fertilizantes; por ejemplo en un cultivo de tomate en arena el drenaje fue de $9.94 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Dhakal *et al.*, 2005). Otros autores mencionan que de los costos totales de operación el rubro de fertilizantes puede llegar a representar 9.3 % en una empresa con media y alta tecnología (nivel de inversión de \$90 a 53 usd/m^2) y 20.3 % en una empresa con baja tecnología (nivel de inversión de $< \$37 \text{ usd/m}^2$) (Lamas, 2011).

La solución de nutrientes que es lixiviada (solución de drenaje), puede contener cantidades considerables de nutrientes tales como nitratos y

fosfatos y por tanto, generar una contaminación del medio ambiente (Savvas *et al.*, 2007).

El sistema cerrado o recirculación de solución nutritiva implica que la solución que drena del sistema se vuelve a incorporar total o parcialmente, como suministro a la fertirrigación del mismo cultivo (Urretarazu, 2004).

La recirculación de la solución nutritiva implica renovar la pérdida de agua ajustando la solución nutritiva desde el punto de vista de composición nutrimental, pH y conductividad eléctrica. Al implementar este sistema se hace recurrente el análisis químico del agua de drenaje, cambios en los patrones de consumo de agua y nutrientes de las plantas, además de monitoreo de enfermedades causadas por hongos y bacterias presentes en el drenaje (García, 2007).

En cultivos manejados con el sistema cerrado, como es el caso del Jitomate, los nutrientes como el nitrógeno, (NO_3^+), potasio (K^{++}) y fósforo ($\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$), son los que presentan la mayor demanda y consumo en las plantas con respecto a elementos como el calcio (Ca^{2+}), y magnesio (Mg^{2+}). Los beneficios económico-ambientales que se han obtenido en el cultivo de jitomate han sido ahorro de hasta 45 % en agua y 70 % en fertilizantes (NO_3^{1-} , $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$, K^{1+}) (García 2007). En otros trabajos de investigación la recirculación de solución nutritiva que se aplica a las hortalizas ha reflejado una reducción del gasto de agua equivalente al 30 % y para fertilizantes como nitrógeno el ahorro fue también del orden de 30% (Dhakal *et al.*, 2005).

Dentro de las ventajas del sistema cerrado o recirculación de solución nutritiva se puede mencionar que como el drenaje constantemente se está

reutilizando, existe una reducción del lixiviado de nutrientes al medio ambiente, un ahorro significativo de agua y como consecuencia un mejor control en el suministro de nutrientes, y un menor riesgo de contaminación del agua subterránea (Dhakal *et al.*, 2005), con el fin de reducir los costos ambientales y económicos.

La desventaja de manejar el sistema cerrado o recirculación de solución nutritiva, es que al existir un cambio constante en el suministro de nutrientes en la solución nutritiva, genera la posibilidad crear un desbalance en el ambiente de la raíz, con efectos perjudiciales, debido a la deficiencia de nutrientes, toxicidad, o salinidad por lo que es necesario ejecutar análisis químicos frecuentes del drenaje para estimar el consumo de nutrimentos (García, 2007). Además, también existe el riesgo de dispersión de enfermedades que se pueden transmitir hacia la raíz con un progreso mínimo de síntomas foliares hasta que la planta muere con la solución de nutrientes reciclados que se aplican. La propagación de enfermedades en estos sistemas se ve favorecida por las condiciones ambientales adecuadas que se presentan en la rizósfera (Premuzic *et al.*, 2007).

Para reducir este peligro, la solución nutritiva debe ser tratada antes de reutilizarse y al respecto Van Os (2009) considera lo siguiente. Los productores se inclinan por aquellos métodos de desinfección de menor costo anual. Existen métodos químicos y no químicos y en función de la superficie y sistema cerrado es el desempeño de cada uno. Para cultivos mayores de 2 has los tratamientos con calor y radiación UV son la mejor opción; para superficies menores de 1 ha la filtración lenta con arena es más adecuada.

Otros métodos para desinfectar la solución nutritiva de acuerdo con Ikeda *et al.* (2002) son:

Tratamiento Térmico: Consiste en la exposición de la solución a una temperatura de 85 °C por 3 min con el objetivo de erradicar a *Fusarium* y Virus del Mosaico del Tabaco. En el caso de la eliminación de bacterias y nemátodos se requiere de una temperatura de 60 °C por 2 min.

Radiación Ultravioleta: Es la radiación electromagnética con una longitud de onda de 100-400 nm. Donde la longitud de onda efectiva para eliminar patógenos oscila en un rango de 200-280 nm, con una máxima efectividad en 254 nm (Van Os, 2009), recomienda en una producción comercial una cantidad de radiación de $100 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$, para la eliminación de hongos patógenos. En el caso de virus es mejor $250 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$. Es importante mencionar que para lograr la eliminación satisfactoria de patógenos es recomendable pasar la solución a través de un filtro antes de someterla a la radiación ultravioleta.

El ozono (O_3), es un potente agente oxidante y reacciona con todo tipo de materia orgánica logrando matar a todos los microorganismos presentes en el agua. La eficiencia del ozono depende del valor de óxido reducción, tiempo de exposición y el pH de la solución. La solución se tiene que prefiltrar para reducir la carga orgánica y el pH se debe bajar para aumentar la estabilidad del ozono. El suministro de ozono en el agua debe ser de $10 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ con un tiempo de exposición de una hora.

Otro de los aspectos que debe tenerse en cuenta en lo que respecta al abastecimiento de agua y nutrientes en los sistemas de recirculación es la cantidad de drenaje que puede variar mucho de un día a otro, al igual que la

concentración de nutrientes de la solución excedente, y por lo tanto puede haber un flujo de entrada de determinadas cantidades peligrosas de Cl^- , Na^- y (SO_4^{2-}) , en particular a partir de agua de mala calidad (Ohta *et al.* 1991).

El desbalance de la solución nutritiva se genera por la presencia en exceso de aquellos iones menos consumidos por la planta (SO_4^{2-}), lo que rompe el equilibrio de nutrientes y en la mayoría de las veces incrementa la CE a niveles que afectan el crecimiento y rendimiento (Savvas *et al.*, 2009; Zekki *et al.*, 1996; Giuffrida *et al.*, 2009).

Lo anterior genera uno de los puntos más débiles de la recirculación que es la falta de información sobre el manejo de la solución nutritiva. Muchos productores e investigadores suministran la solución de nutrimentos en la recarga a intervalos semanales. Otros recomiendan la medición de la concentración de nutrimentos concretos en la solución como una clave para el control y el mantenimiento de la misma, generando iones de seguimiento en la solución que no siempre son necesarios; de hecho el rápido agotamiento de algunos nutrientes a menudo hace que la gente agregue cantidades de nutrientes a la solución por arriba de los niveles establecidos (Bugbee, 2004). De esta manera se genera una acumulación de iones que se absorben escasamente por las plantas en la zona radicular, lo que reduce la eficiencia de los ciclos de cultivo en sistemas cerrados (Savaas *et al.* 2007).

El llevar un control estricto de la solución nutritiva, genera una estrategia que se apoya en los constantes análisis químicos de la solución nutritiva recirculante, haciendo difícil su aplicación a escala comercial por la gran

cantidad de análisis que se requerirían, el costo y el tiempo que ellos implican.

En el mercado existen sensores de iones selectivos que ofrecen la posibilidad de determinar en minutos la concentración del ion en la solución nutritiva. Entre las diferentes marcas existen iones selectivos de NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , NO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} . Sin embargo, una desventaja es que su costo es muy elevado.

Ante la necesidad de desarrollar y valorar equipos económicos y prácticos que ayuden en la toma de decisiones, Gutiérrez *et al.* (2007) proponen el uso de una lengüeta electrónica para la supervisión de la composición nutritiva en sus iones NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Cl^- y NO_3^- . Esta aproximación de análisis químico consiste en un arreglo de sensores acoplados con una herramienta multivariada de calibración. El sistema está formado por un arreglo de ocho sensores potenciométricos basados en membranas poliméricas (PVC). El proceso de respuesta cruzada se basa en un modelo de red neuronal artificial multicapa (ANN, artificial neural network). Según reportan, el modelo predijo la concentración de los valores de amonio, potasio, nitrato y de los compuestos salinos indeseados como sodio y cloruro en la solución nutritiva, solución drenada y el agua de riego. Los resultados mostraron una buena capacidad de predicción para los diversos iones con excepción del cloruro, donde los efectos de interferencia fuertes del nitrato no pudieron ser cuantificados. El sistema parece factible para la valoración en línea de nutrientes y de compuestos indeseados en soluciones de fertirriego.

2.4. Cultivo de Lechuga

Esta es una hortaliza de hoja típica de ensaladas, actualmente aunque se puede encontrar de forma silvestre, la mayoría de las variedades de lechuga que se cultivan comercialmente son producto de la hibridación. Su valor en el mercado se da por el alto contenido de vitaminas, dado que se maneja como un producto de la cuarta gama (Maroto, 1999). En algunos países como China y Egipto, los tallos se consumen en vez de hojas de lechuga, ya sea cocidas o en crudo. Algunos usos menos comunes para las lechugas incluyen un cigarrillo sin nicotina a partir de hojas de lechuga, aceite comestible extraído de las semillas de lechugas silvestres, y un sedante de látex que se obtiene a partir de tallos y otros tejidos de lechuga que se utiliza para fabricar un medicamento inductor del sueño (Ryder, 1986).

2.4.1. Importancia económica mundial del cultivo de lechuga

A nivel mundial en el 2011 se reporta una producción de 22,382,300 toneladas y los principales países productores se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Situación mundial del cultivo de lechuga en diferentes países y regiones en 2011.

País o Región	Área Cosechada (ha)	Producción (toneladas)	Rendimiento (kg/ha)
Australia	6121	127200	20786.00
Austria	1600	61900	38688.00
Bangladesh	7689	32000	4162.00
Bélgica	2204	80000	36298.00
Canadá	3891	92400	23739.00
Chile	6600	90000	13636.00
China	500250	11005000	21999.00
Egipto	6000	140000	23333.00
Francia	16500	526000	31879.00
Alemania	8200	200000	24390.00
Grecia	4200	80000	19048.00
Guatemala	1900	38000	20000.00
Irán	3600	90000	25000.00

Israel	950	40000	42105.00
Italia	43604	846800	19420.00
Japón	22000	530000	24091.00
Jordania	1278	35000	27383.00
México	11290	243400	21559.00
Holanda	2000	73000	36500.00
Nueva Zelanda	1300	31000	23846.00
Nigeria	4400	40000	9091.00
Perú	2900	33000	11379.00
Portugal	4400	95000	21591.00
Sudáfrica	2194	33000	15003.00
Korea del Sur	7000	210000	30000.00
España	39000	920000	23590.00
Suecia	1160	35000	30172.00
Suiza	2500	53000	21200.00
Turquía	19700	375000	19036.00
Inglaterra	5514	135000	24483.00
Estados Unidos	131280	4976900	37910.00
Venezuela	1500	31000	20667.00
África	15484	270600	17477.00
Asia	689699	13213300	19158.00
Este de Europa	5558	57600	10354.00
Oeste de Europa	130425	3098800	23759.00
Norte y Centro América	150838	5374400	35630.00
Sur América	15174	198400	13078.00

FAOSTAT, 2011.

2.4.2. Descripción Botánica

Planta anual perteneciente a la familia Compositae, cuyo nombre científico es *Lactuca sativa* L. Presenta un sistema radical columnar y pivotante con ramificaciones secundarias muy numerosas que se desenvuelven de manera subterránea. Sus hojas forman un cogollo más o menos consistente, de color verde pálido oscuro. Las hojas pueden adaptar una forma redonda, lanceolada o casi espatulada, de consistencia correosa o blanduzca (Maroto, 1999 y Pérez, 1997).

2.4.3. Variedades de Lechuga

Botánicamente, en *Lactuca Sativa* L. se distinguen cuatro variedades botánicas (Maroto, 1999 y Pérez, 1997):

Lactuca Sativa var *longifolia* Lam: Son aquellas lechugas que se aprovechan por sus hojas, estas forman un verdadero cogollo, que tiene una forma generalmente aovada u oblonga, por la adaptación a una estación determinada se pueden clasificar lechugas de invierno (Romana Larga Encarnada, Romana Larga Verde, Gorrión, Inverna, Valladolid, etc), y lechugas de primavera verano (Tres Ojos Verde, Tres Ojos blanca, Romea, Rubia de Verano, etc.).

Lactuca Sativa var *inybarcea* Hort : Son aquellas que poseen hojas sueltas y dispersas.

Lactuca Sativa var *augustana* Irish: Estas lechugas se caracterizan por que la parte comestible es el tallo, sus hojas son puntiagudas y lanceoladas.

Lactuca Sativa var *capitata* Lam: Se caracterizan por formar un cogollo apretado de hojas. La forma de sus hojas suele ser ancha, orbicular (lechugas acogolladas), por la consistencia de sus hojas se pueden dividir en dos grupos las de hoja consistente (Garavan, Salinas, Halcon, Padrina, Montemar, Batavia, Astral, etc), y las de hoja mantequilla (Trocadero, Ravel, Corine, Elsa, Reina de Mayo, Clarion, Mirena, Aprilia, etc.).

2.4.4. Valor Nutrimental

En el Cuadro 2, se presenta la composición nutrimental para diferentes variedades de lechuga que se manejan a nivel comercial.

Cuadro 2. Composición nutrimental de los diferentes tipos de lechuga que se comercializan en el mercado en 100 gramos de peso fresco

Nutriente	Crispa	Mantequilla	Escarola	Hoja Verde	Romana
Agua, g	95.6	95.6	95.6	95.1	94.6
Energía, Kcal	14	13	16	15	17
Proteína, g	0.90	1.35	1.33	1.36	1.23
Grasa, g	0.14	0.22	0.22	0.15	0.30
Carbohidratos, g	2.97	2.23	2.26	2.79	3.28
Fibra Dietética, g	1.2	1.1	0.9	1.3	2.1
Azúcar Total, g	1.76	0.94	0.48	0.78	1.19
Calcio, mg	18	35	33	36	33
Fierro, mg	0.41	1.24	1.20	0.86	0.97
Magnesio, mg	7	13	12	13	14
Fosforo, mg	20	33	28	29	30
Potasio, mg	141	238	187	194	247
Sodio, mg	10	5	25	28	8
Zinc, mg	0.15	0.20	0.20	0.18	0.23
Cobre, mg	0.025	0.016	0.028	0.029	0.048
Manganeso, mg	0.125	0.179	0.203	0.250	0.155
Selenio, mg	0.1	0.6	1.5	0.6	0.4
Vitamina A, IU*	502	3312	7492	7405	5807
Vitamina B-6, mg	0.042	0.082	0.100	0.090	0.074
Vitamina C, mg	2.8	3.7	3.7	18.0	24.0
Vitamina E, mg	0.18	0.18	0.15	0.29	0.13
Tocoferol, mg	0.09	0.27	0.24	0.37	0.36
Vitamina K, pg	24.1	102.3	140.3	173.6	102.5
Niacina, mg	0.123	0.357	0.321	0.375	0.313
Ácido Pantoténico, mg	0.091	0.150	0.144	0.134	0.142
Riboflavina, mg	0.025	0.062	0.077	0.080	0.067
Tiamina, mg	0.041	0.057	0.064	0.070	0.072

USDA, 2011.

2.4.5. Factores ambientales que favorecen el desarrollo de lechuga tipo mantequilla

La temperatura que requiere el lechuga permite que se cultive especialmente en las regiones templadas y subtropicales. Así esta hortaliza es un cultivo que se adapta mejor a las bajas temperaturas que a las altas. La temperatura óptima para el crecimiento oscila entre 18 a 23 °C, durante el día y 7 a 15 °C durante la noche, como temperatura máxima se puede

considerar los 30 °C y como mínima puede soportar temperaturas de hasta -1 °C (Jaques y Hernández, 2005).

La capacidad de la radiación solar es de suma importancia para el invernadero, desafortunadamente no toda la radiación que se recibe en este se aprovecha por las plantas. El requerimiento de horas luz en la lechuga llega hacer de una intensidad de 8 watt m⁻² con una duración de 14 a 15 horas luz. Hee y Beom *et al.*, (2001) recomiendan una intensidad de luz de 200 a 300 µmol·m⁻² s⁻¹

Este cultivo para su mejor desarrollo requiere de una humedad relativa del 60 al 80 %, aunque puede tolerar humedades menores a 60 % (Maroto, 1999).

El requerimiento nutricional de acuerdo con los datos de extracción nutrimental para producir una tonelada de lechuga, se requiere 2 kg de nitrógeno, 0.5 kg de fósforo, 4.3 kg de potasio, 0.9 kg de calcio, 0.2 kg de magnesio (Ciampitti, 2004). Para un cultivo de lechuga tipo mantequilla que se manejó en sustrato de perlita en recirculación a lo largo de 4 ciclos de producción que coinciden con las cuatro estaciones del año, la absorción promedio por día de nitrógeno es de 8 a 16 mg, mientras que de fósforo es de 2.5 a 5 mg, en el caso de potasio varia de 11.5 a 23 mg (Schippers *et al.*, 1980).

A continuación se presenta soluciones nutritivas que se han manejado por diversos autores en hidroponía para lechuga (Cuadro 3).

Cuadro 3. Soluciones nutritivas propuestas por diversos autores para cultivo de lechuga en sistemas hidropónicos.

Nutrimento (mg·L ⁻¹)	Shippers, <i>et al.</i> , 1980	Ananda, <i>et al.</i> , 2000	Premuzic <i>et al.</i> , 2006	Valverde <i>et al.</i> , 2009	Scuderi, <i>et al.</i> , 2009
N	205	198	252	190	212
NO ³⁻	195	135	-	130	198
NH ⁴⁻	10	63	-	60	14
P	50	70	54	35	57
K	210	228	312	210	234
Ca	190	143	169	150	170
Mg	30	30	48	45	40
S	39	117	65	70	48
Fe	3	1.5	0.35	1	-
Cu	0.06	0.03	0.32	0.1	-
Mn	0.5	0.3	0.78	0.5	-
Mo	0.1	0.005	0.35	-	-
Zn	0.08	0.03	0.48	1.15	-

2.5 Manejo de lechuga en diferentes sistemas hidropónicos bajo condiciones de invernadero

2.5.1. Sistema de balsas flotantes

El cultivo de lechuga es rentable cuando se maneja mediante un sistema de hidroponía profunda (balsas flotantes). Este sistema permite la obtención de materia prima de primera calidad, favoreciendo una reducción en la contaminación microbiológica y contenido de nitratos (Gonnella *et al.*, 2003; Zanin *et al.*, 2009).

Dentro de los sistemas alternativos de producción para hortalizas de hoja bajo condiciones hidropónicas se encuentra el cultivo de lechuga en mesas flotantes o hidroponía profunda, que consiste en colocar contenedores con solución nutritiva y un soporte para las plantas, que generalmente es una placa de unicel (poliestireno expandido), la cual cubre totalmente la solución, además de tener orificios donde se colocaran las plantas, dado que la raíz

de la planta está inmersa en una capa delgada de agua, la cual tiene los nutrientes en forma disuelta para que la planta los aproveche, dicha solución debe estar continuamente en movimiento para aportar oxígeno a la raíz; sin embargo, por esta condición existe el riesgo de desarrollar problemas fitosanitarios que es necesario controlar para lo cual se utilizan mecanismos de esterilización a base de ozono y luz ultravioleta que eliminan hongos y bacterias que pueden dañar la planta a nivel de raíz. El sistema de mesas flotantes es uno de los más empleados para la producción de lechuga tipo mantequilla que garantiza mayor rendimiento (Carrasco, 2004).

La producción de lechuga tipo mantequilla se pueden establecer bajo condiciones de hidroponía profunda, en camas de 1m X 2.5 m X0.4 m (largo*ancho*alto), con un volumen de solución nutritiva de 1 m³, y con una densidad de 32 plantas por metro cuadrado, las cuales se sostienen a través de una placa de poliestireno de 0.381 m de grosor (Freza *et al.*, 2005).

2.5.2. Sistema de hidroponía NFT

El sistema de recirculación de solución nutritiva NFT (Nutrient Film Technique), se desarrolló en el Glasshouse Crop Research Institute, Inglaterra, en la década de los sesenta. El principio de este sistema hidropónico consiste en la circulación constante de una lámina fina de solución nutritiva que pasa a través de las raíces del cultivo, sin pérdida o salida al exterior de la solución nutritiva, por lo que se constituye como un sistema cerrado. La densidad de plantas en el caso de cultivo de lechuga, bajo este sistema es de 22 a 24 plantas por metro cuadrado según el cultivar. El tiempo aproximado de trasplante a cosecha es de 25 a 40 días. La solución nutritiva se debe tener en un rango de conductividad de 1.5 a 2.5

mS·cm⁻² y un pH de 5.5 a 6, siendo el consumo de solución de aproximadamente 0.25 litros/planta. En este cultivo el canal es de porte bajo y con un ancho de 6 cm (Carrasco, 2004).

2.5.3. Sistema en sustrato sólido

En el manejo de lechuga bajo este sistema se pueden utilizar sustratos como la turba y lana de roca, donde la densidad de siembra es de 20 plantas por metro cuadrado en el caso de *Lactuca Sativa* var. *capitata*. El tiempo aproximado de trasplante a cosecha es de 34 días en primavera, mientras que en otoño es de 26 días. La solución nutritiva debe tener en un rango de conductividad de 0.5 a 1.7 dSm⁻¹ según su estado fenológico y un pH de 5.5 (Stepowska y Kowalczyk, 2001).

El consumo de solución es aproximadamente 0.5 L/planta en camas y 1.5 a 2 L/planta en bolsas, utilizando como sustrato lana de roca, con un rendimiento que varía de acuerdo a la época del año. Para el caso de lechuga que se trasplantó en otoño, el peso fresco por pieza es de 140 g en cama a 150 g en bolsa que resulta menor en comparación con lechugas que se trasplantaron primavera, donde el peso fresco por pieza oscila entre 226 g en cama a 236 g en bolsas (Stepowska y Kowalczyk, 2001).

El rendimiento fue de 310 g en bolsas y 330 g en cama, que se obtuvo bajo las mismas condiciones de riego, pero utilizando turba durante la primavera (Stepowska y Kowalczyk, 2001).

La lechuga tipo mantequilla bajo un sistema de recirculación se puede manejar utilizando camas de perlita de 4.40 m de largo por 1.52 m de ancho, las cuales presentan 8 hileras con un arreglo de 8 cm de ancho y 5 cm de profundidad, con una distancia entre hilera de 19 cm. Las lechugas se

trasplantan sobre la hilera a una distancia de 20 cm, con un gasto promedio de solución nutritiva de 1.15 L/planta. El periodo de trasplante a cosecha tiene una duración de 4 semanas en primavera y 9 semanas en invierno. Aunque la disponibilidad de la solución nutritiva fue sólo 1.15 L/ planta, el tamaño pequeño y el crecimiento relativamente lento del cultivo es la razón por lo que toma tiempo para que los nutrientes desaparezcan, sobre todo en el invierno. Lo anterior permite realizar una sola fertilización para el período de crecimiento a cosecha. Sin embargo, es importante mencionar que es necesario realizar análisis por semana para el monitorear la solución que se va recircular (Schippers, 1980).

Otra propuesta para el manejo de este cultivar consiste en cultivarla con una densidad de plantación de 18 plantas por metro cuadrado en camas de 5 m X 0.4 m X 0.3 m (largo*ancho*altura) (Frezza *et al.*, 2005).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del sitio experimental

El experimento se llevó a cabo durante el período de Marzo a Julio de 2010, en un invernadero del Posgrado en Horticultura del Departamento de Fitotecnia, en la Universidad Autónoma Chapingo, localizado en el municipio de Texcoco, Estado de México en las coordenadas geográficas 19° 31' de latitud norte y 98° 51' de longitud oeste, con respecto al meridiano de Greenwich; a una altura aproximada de 2240 m., el clima es C (wo) (W) b (i) g.

3.2 Material Vegetal

Se utilizó lechuga tipo mantequilla cv Cortesana M1 de la casa comercial Hydroenvironment.

3.3. Sistemas de Producción

Se establecieron 3 sistemas de producción, los cuales conformaron los tratamientos de evaluación.

- a) Sistema hidropónico sin recirculación de la solución nutritiva (T1)
- b) Sistema hidropónico con recirculación de la solución nutritiva (T2).
- c) Sistema de Hidroponía Profunda (T3)

Para conformar los dos primeros tratamientos se construyeron e instalaron contenedores que consisten en cajones de madera de 1.90 largo X .90 ancho X 0.30 m de profundidad, colocados con una pendiente del 5 %; esto con el objetivo de captar más fácilmente el drenaje de la solución nutritiva. Los cajones de madera (camas de cultivo) se forraron con un plástico negro de 1000 galgas (Figura 1).

Adicionalmente se les colocó otro segmento de plástico negro de 1000 galgas en el extremo inferior derecho con orientación a la parte baja de la pendiente que ayudaría a la recolección del drenaje. Posteriormente las camas de cultivo fueron rellenas con arena de tezontle de dos granulometrías hasta una altura de 25 cm. Una primera capa de 7 cm de grava de tezontle (partículas de 2 cm de diámetro) y una segunda capa de 18 cm con partículas más finas (3-5 mm de diámetro).

La captación del drenaje en ambos sistemas sin y con recirculación de la solución nutritiva, se realizó en un extremo inferior de la cama, para lo cual en la base del plástico se hicieron perforaciones de 2 mm a cada 25 cm. Con el mismo plástico negro se hizo una canaleta que condujo el agua drenada a una cubeta de plástico de 18 litros cubierta por medio de una malla mosquitera (Figura 1).



Figura 1. Cama de cultivo forrada con plástico negro.

El sistema de riego que alimentó a las plantas en los tratamientos sin recirculación y con recirculación nutritiva, consistió en 3 depósitos, cada uno de 450 litros (Figura 2); dos de ellos suministraron solución nutritiva normal y el otro una solución reciclada previamente esterilizada con lámparas UV de 25 Watts. Para regular el flujo de la solución nutritiva en los tinacos hacia cada una de las camas de siembra, se utilizaron llaves tipo esfera para tubería de 1 pulgada. Para monitorear la presión de salida hacia los goteros

se utilizó un manómetro de glicerina con el objetivo de lograr que la presión fuera de 3 kg cm². Se colocaron las líneas regantes a lo ancho de las camas de cultivo y sobre éstas tres cintas de goteo de 16 mm, con emisores a cada 30 cm.



Figura 2. Sistema de abastecimiento de solución nutritiva para los tratamientos T1 y T2.

Para la conformación del tratamiento de hidroponía profunda (T3), se utilizaron contenedores de madera con las mismas dimensiones de las usadas en los otros sistemas (450 L de capacidad). A una altura de 25 cm, se le hizo un agujero de 2 pulgadas que se usaría para regular el nivel de la solución nutritiva. En este caso, en vez de sustrato, se usó únicamente solución nutritiva y las plantas solamente fueron sostenidas con placas de unigel perforadas. Para proporcionar oxígeno a la raíz, se utilizó bombas de acuario modelo AC-9602 y manguera de polietileno con un diámetro de 5 mm (Figura 3).



Figura 3. Sistema de abastecimiento de oxígeno en solución nutritiva en el T3.

3.4. Diseño y unidad experimental

Se usó un diseño experimental en bloques completos al azar con cinco repeticiones para cada sistema de producción (Figura 4). La unidad experimental fue de 55 plantas, mismas que fueron establecidas en un marco real de plantación con una distancia entre hileras y entre plantas de 16 cm (32 plantas por m²).



Figura 4. Distribución y vista general de las unidades experimentales para los tratamientos en el cultivo de lechuga tipo mantequilla.

3.5. Manejo del cultivo

3.5.1. Semillero

Se establecieron 2 fechas de siembra con el objetivo de evaluar dos ciclos de cultivo; la primera siembra se hizo el 15 de febrero de 2010 (ciclo 1), y la segunda el 11 de mayo del mismo año (ciclo 2). La obtención de la plántula consistió en colocar en una charola de poliestireno de 200 cavidades una mezcla de Vermiculita con Agrolita en una relación 1:1, que se mezcló previamente con agua hasta llegar a capacidad de campo y que sirvió como sustrato; después se colocó una semilla de lechuga en cada cavidad a una profundidad de 0.3 cm, y se cubrió con una capa muy fina de 0.5 cm de espesor de vermiculita. Al finalizar la siembra de las semillas en las charolas, fueron regadas con agua en la mañana y en la tarde durante 3 días hasta la emergencia. En los siguientes 28 días, las plántulas fueron regadas con una solución nutritiva que contenía los siguientes elementos minerales ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$):

N=87.5, P=21, K=87.5, Ca=87.5, Mg=21, S=72, Fe=1, Mn=0.035, B=0.15, Cu=0.035, y Zn=0.035; que representa aproximadamente el 50 % de la solución nutritiva propuesta por Sánchez y Escalante (1988). Los riegos se hicieron 3 veces al día.

3.5.2. Trasplante

Esta actividad se realizó en 2 fechas, la primera el 15 de marzo de 2010 (ciclo 1), mientras que la segunda se llevó a cabo el 10 de Junio de 2010 (ciclo 2), actividad que se hizo cuando las plántulas tenían una altura promedio de 15 cm y 4 hojas verdaderas.

3.5.3. Riegos

Se usó el sistema de riego por goteo descrito anteriormente. En los tratamientos que ocuparon sustrato (T1 y T2), se programaron 3 riegos diarios desde el momento del trasplante hasta los 10 días posteriores; en los siguientes cinco días se aplicaron cuatro riegos al día y del día 15 después del trasplante hasta la cosecha se hicieron 5 riegos diarios. Cada riego fue de 5 minutos. En el T3 (sistema de hidroponía profunda o balsas) sólo se repuso el contenido de agua hasta llegar a los 450 litros que se establecieron mediante el nivel con la siguiente frecuencia. En los primeros 7 días sólo se tuvo una reposición, en los 7 días posteriores se tuvieron 2 reposiciones, de ahí en adelante y hasta llegar a cosecha se repuso el agua cada 3 días.

3.5.4. Control de Plagas y Enfermedades

El único problema que se tuvo en el invernadero fueron larvas de gusano medidor (*Spodoptera exigua*). Para su control se utilizó Desis Forte de la

casa comercial Bayer en una dosis de 1 ml por 10 litros de agua que se aplicó en una sola ocasión.

3.5.5. Fertilización

Para los tres tratamientos, se aplicaron los riegos con la solución nutritiva indicada en el Cuadro 4. Las fuentes de fertilizantes usadas fueron las que se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Composición del agua y solución nutritiva.

	pH	CE (dS·m ⁻¹)	Concentración (mg·L ⁻¹)									
			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	P-H ₂ PO ₄ ⁻	S-SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
AGUA	7.61	0.2	5	22	2.43	16	0	0.74	0	11.2	10.63	0.56
SN	5.8	1.8	170	118	39.5	16	0	139.6	42	132.8	10.63	0.56

Cuadro 5. Fuentes de fertilizante usadas para preparar la solución nutritiva.

<p>ÁCIDO FOSFÓRICO AL 85 %</p> <p>H₃PO₄</p> <p>P: 27 %; Densidad: 1.7 g·ml⁻¹</p>	<p>SULFATO DE MANGANESO</p> <p>MnSO₄·4H₂O</p> <p>Mn: 22.6 %</p>
<p>SULFATO DE POTASIO</p> <p>Fórmula: K₂SO₄</p> <p>K: 42.75 %</p>	<p>SULFATO DE COBRE</p> <p>Fórmula: CuSO₄·5H₂O</p> <p>Cu: 25.5 %</p>
<p>SULFATO DE MAGNESIO</p> <p>Fórmula: MgSO₄·7H₂O</p> <p>Mg: 9.64 %</p>	<p>TETRA BORATO DE SODIO (BORAX)</p> <p>Fórmula: Na₂B₄O₇·10H₂O</p> <p>B: 2.83 %</p>
<p>NITRATO DE CALCIO</p> <p>Fórmula: Ca(NO₃)₂</p> <p>Ca: 19.0 %; N-NH₄: 1.1 %; N-NO₃: 14.4 %</p>	<p>QUELATO DE HIERRO</p> <p>EDTA</p> <p>Fe:13%</p>
<p>SULFATO DE ZINC</p> <p>Fórmula: ZnSO₄·7H₂O</p> <p>Zn: 22.6 %</p>	

En el segundo ciclo de evaluación, para el caso del sistema de hidroponía con recirculación de solución nutritiva (T2), se consideró la concentración de cada elemento presente y el volumen de solución nutritiva recuperada. Si era necesario se agregó agua simple para lograr acercarse a la concentración de inicio (Cuadro 4); en caso contrario se recurrió a las fuentes de fertilizante para reponer los elementos faltantes (Cuadro 5), esta última situación fue lo que siempre se manifestó en el sistema de balsas flotantes (T3). Una vez ajustada la solución se procedió a aforar a 450 litros (capacidad de los tinacos) con solución nutritiva normal (Cuadro 4).

3.6. Caracteres evaluados

3.6.1. Rendimiento y sus componentes

Se hicieron 4 cortes en cada ciclo. Como ya se señaló en el primer ciclo los muestreos se realizaron a los 16, 23, 32 y 39 ddt (días después del trasplante). Para el segundo ciclo los muestreos se realizaron a los 10, 17, 24 y 29 ddt, donde se midieron diámetro de cabeza, peso seco y peso fresco por planta, mientras que el número, largo, ancho de hojas se midieron a los 32 ddt en el primer ciclo y 24 ddt para el segundo ciclo.

- **Peso Fresco:** A cada una de las muestras que se les midió el largo y ancho de la hoja, y se obtuvo el peso fresco con el apoyo de una balanza digital con sensibilidad de 0.1 g.
- **Peso Seco:** Una vez determinado el peso fresco, las muestras se sometieron a un proceso de secado en una estufa de aire forzado durante 48 horas con temperatura constante de 70 °C, se

mantuvieron así hasta peso constante. Se les tomó el peso seco con una balanza digital con sensibilidad de 0.1 g.

- **Diámetro de cabeza en planta:** Se tomaron 2 muestras de cada repetición en los tres tratamientos, Esta variable se registró cada 10 días hasta llegar a cosecha.
- **Número de hojas:** De cada planta en que se le midió el ancho, se contó el número de hojas, considerando que las hojas al menos tuvieran 7 cm de ancho y 15 cm de largo.
- **Largo y Ancho de hojas:** A cada una de las hojas que se cuantificó en las variables anteriores, se le determinó el largo y ancho tomando el ancho en la parte media de la hoja y el largo desde el ápice de la hoja hacia el punto donde se une con el tallo.

3.6.2. Condiciones en la rizósfera

- **Conductividad eléctrica y pH.** Estas variables se registraron diariamente mediante un potenciómetro y conductímetro modelo HI 98130 de la marca Hanna en la solución de drenaje para los tratamientos T1 y T2, mientras que para el T3, se midieron en la solución que alimentaba al sistema radical.
- **Temperatura del sustrato:** Este parámetro se tomó mediante el registro de temperatura mínima y máxima del sustrato, que sirvió como sostén de la planta, en horarios de 7:00 hrs. y 16:00 hrs. con un termómetro Hanna de penetración modelo HI-145.

3.6.3. Condiciones ambientales dentro del invernadero

Temperatura y Humedad Relativa del aire: Estas variables se registraron diariamente desde el establecimiento del cultivo en el invernadero hasta la cosecha en intervalos de 5 minutos con un Data Logger, modelo U09 de la marca Onset, el cual se colocó en el centro del invernadero.

Temperatura dentro del invernadero: La temperatura dentro del invernadero para el ciclo 1 se presentó de la siguiente manera, entre 36 a 44 °C para la máxima, la media de 17 a 24°C y la mínima entre 3 a 13 °C (Figura 5a).

Para el ciclo 2, las temperaturas fueron: entre 32 a 45 °C como la máxima, la media de 23 a 29 °C y la mínima entre 10 a 16 °C (Figura 5b).

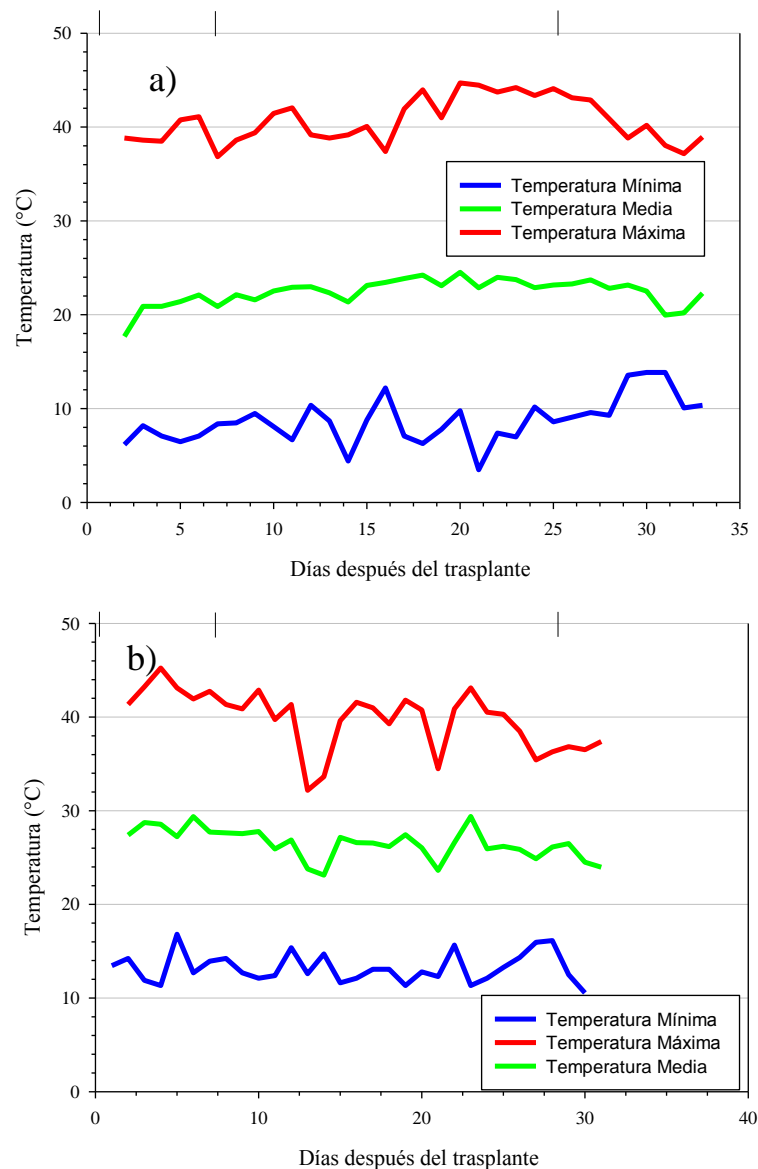


Figura 5. Comportamiento de la temperatura en el invernadero en el ciclo 1 (a) y ciclo 2 (b),

- Humedad relativa dentro del invernadero: La humedad relativa dentro del invernadero para el ciclo 1 osciló entre 31 y 94 % como máxima, de 20 a 65 % como media y la mínima entre 15 a 18.1 % (Figura 6a).
- Para el ciclo 2, la humedad relativa máxima osciló entre 84 a 98 %, la media de 50 a 75 % y la mínima entre 15 a 43 % (Figura 6b).

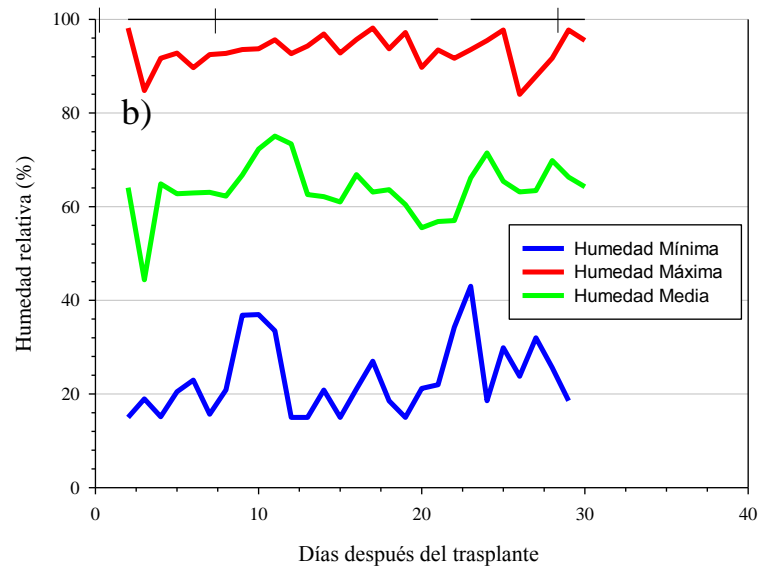
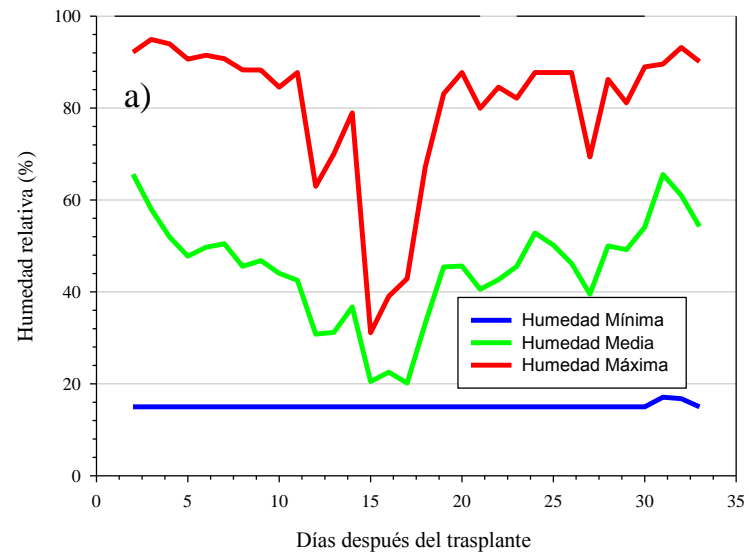


Figura 6. Comportamiento de la humedad relativa en el invernadero para ciclo 1 (a) y ciclo 2 (b)

3.6.4 Agua y Nutrientes

- Volumen de agua consumida: El gasto y consumo de agua en litros se calculó usando los datos de gasto de agua registrados con el medidor de flujo para el T1 y T2. Mientras que en tratamiento T3 sólo se midió manualmente utilizando un recipiente de 10 litros.
- Volumen de drenaje: Este valor se cuantificó diariamente, el procedimiento consistió en vaciar el contenido de cada repetición del T1 y T2 en una probeta de 2 L., y registrar el valor en una bitácora donde se indicó el número de repetición y el tratamiento. El drenaje que se captó del sistema de hidroponía con recirculación de solución nutritiva se colectó en cubetas de plástico, y una vez que se le tomó el volumen, se acopió en un tinaco de 450 litros.
- Niveles de NO_3^{1-} , K^{1+} , Ca^{2+} y P: Estos valores, se midieron al final del ciclo de producción en el tinaco donde se captó el drenaje del tratamiento que corresponde al sistema de hidroponía con recirculación de solución nutritiva y en cada una de las repeticiones del tratamiento en balsas flotantes. El procedimiento consistió en tomar una muestra de 250 ml, la cual se colocó en una botella de polietileno del mismo volumen, ésta se llevó al laboratorio de Nutrición Vegetal del Departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Chapingo donde se mantuvo en refrigeración hasta el momento de su análisis.

Para analizar los nutrientes (N-NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} y P) se usó un electrodo de ion selectivo (ISE) (Thermo Scientific®); para K^+ , Ca^{2+} y N-NO_3^- ,

para P se usó la técnica colorimétrica para el desarrollo de color por el método de molibdobanadato (Chapman y Pratt, 1973).

3.7 Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con 5 repeticiones con el apoyo del SAS (Statistical Analysis System, 1979); se hizo un análisis de varianza y comparaciones de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).

Debido a que en cada ciclo de cultivo los datos fueron medidos en diferentes edades de la planta, el análisis se hizo en forma independiente para cada ciclo de evaluación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Rendimiento y sus componentes

Para el primer ciclo se observa que el tratamiento de hidroponía profunda presentó significativamente mayor peso fresco y peso seco, respecto a los tratamientos con y sin recirculación de la solución nutritiva. Entre estos últimos, no hubo diferencia estadística (Cuadro 6).

En hidroponía profunda, ya no se registraron datos en la evaluación a los 39 ddt debido a que en cada tratamiento, la cosecha final se tuvo a los 32 ddt, lo que indica que con este sistema, hubo una precocidad de 7 días, respecto a los otros tratamientos.

El número de hojas solamente se midió a los 32 ddt; en esta variable no hubo diferencia estadística entre los tratamientos.

Cuadro 6. Comparación de medias entre tratamientos en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 1.

TRATAMIENTO	Peso fresco por planta (g)			
	16 ddt	23 ddt	32 ddt	39 ddt
T1 (SR)	2.96 b ^z	15.71 b	82.1 b	173.54 a
T2 (CR)	3.89 b	14.49 b	85.2 b	186.34 a
T3 (HP)	13.22 a	17.49 a	197.22 a	-
DMS	4.7705	0.2165	34.269	35.54
TRATAMIENTO	Peso seco por planta (g)			
	16 ddt	23 ddt	32 ddt	39 ddt
T1 (SR)	0.33 b	1.34 b	4.57 b	7.52 a
T2 (CR)	0.42 b	1.26 b	4.52 b	8.36 a
T3 (HP)	1.05 a	3.63 a	8.74 a	-
DMS	0.3135	0.453	1.6	1.2135
TRATAMIENTO	Número de hojas por planta			
	16 ddt	23 ddt	32 ddt	39 ddt
T1 (SR)	-	-	17.6 a	-
T2 (CR)	-	-	17.6 a	-
T3 (HP)	-	-	18.7 a	-
DMS			1.91	

^z Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$; DMS=Diferencia mínima significativa; SR: Sin recirculación; CR: Con recirculación y HP: Hidroponía profunda.

Para el segundo ciclo de evaluación (inicios de verano), el comportamiento de los tratamientos fue el mismo que en el Ciclo 1, para la variable de peso fresco, es decir, que con hidroponía profunda, se tuvieron lechugas de mayor peso fresco (228 g) que con los sistemas que usaron sustrato (Cuadro 7). En peso seco, esta diferencia ocurrió hasta los 17 ddt, pero a los 24 días, aunque en valores absolutos sí hubo mayor peso en hidroponía profunda que en los sistemas con y sin recirculación a lo largo del ciclo, ya que hubo diferencias estadísticas. En número de hojas tampoco hubo diferencia entre tratamientos.

En este segundo ciclo, debido a las condiciones ambientales en que crecieron las plantas, en particular por la mayor temperatura que incidió con respecto al primer ciclo, la cosecha de la lechuga se hizo en menor tiempo.

En hidroponía profunda, el último corte se hizo a los 24 días y en los otros dos tratamientos, a los 29 ddt. Esto nuevamente muestra la mayor precocidad con que se obtiene la lechuga en hidroponía profunda, respecto al tratamiento con y sin recirculación de la solución nutritiva. Aquí hubo una diferencia en precocidad a favor de hidroponía profunda de 5 días.

Además de la temperatura, la mayor rapidez con que se logró la cosecha en el segundo ciclo, también se debió seguramente a una mayor intensidad de luz recibida por la planta que incidió en el verano, la cual acelera su crecimiento (Falovo *et al.*, 2009).

Cuadro 7. Comparación de medias entre tratamientos en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 2.

TRATAMIENTO	Peso fresco por planta (g)			
	10 ddt	17 ddt	24 ddt	29 ddt
T1 (SR)	7.5 b ^z	38.65 b	186.6 b	219.6 a
T2 (CR)	18.38 ab	35.17 b	168.61 b	219.4 a
T3 (HP)	24.58 a	101.52 a	228.47 a	-
DMS	15.37	9.96	28.54	14.78
TRATAMIENTO	Peso seco por planta (g)			
	10 ddt	17 ddt	24 ddt	29 ddt
T1 (SR)	0.63 b	2.22 b	7.29 a	8.19 a
T2 (CR)	1.16 ab	2.01 b	6.59 a	7.99 a
T3 (HP)	1.5 a	4.98 a	8.84 a	-
DMS	0.7391	0.45	1.06	0.48
TRATAMIENTO	Número de hojas por planta			
	10 ddt	17 ddt	24 ddt	29 ddt
T1 (SR)	-	-	17.9 a	-
T2 (CR)	-	-	18.5 a	-
T3 (HP)	-	-	19.1 a	-
DMS	-	-	1.87	-

^z Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$; DMS=Diferencia mínima significativa. SR: Sin recirculación; CR: Con recirculación y HP: Hidroponía profunda.

(Falovo *et al.*, 2009), establecen que las plantas que crecen en la temporada de primavera, disminuyen su crecimiento y rendimiento (total de materia seca e índice del área de la hoja), pero se logra mayor calidad de la hoja,

con respecto a la que se cultiva en verano (mayor contenido de carbohidratos y menor contenido de nitrato). En el presente estudio, los pesos fresco y seco por planta logrados en el tratamiento sin recirculación e hidroponía profunda fueron también más altos en el ciclo 2 (verano) con respecto al ciclo 1 (primavera).

Con base en el peso fresco por planta, logrado en el momento de cosecha y en particular en el segundo ciclo que fue de 219 g por planta en el tratamiento sin recirculación y recirculación de la solución nutritiva y de 228 g por planta en el tratamiento de hidroponía profunda, y con base en la densidad de población establecida (32 plantas por m²), se obtiene un rendimiento de 7 kg por metro cuadrado en los tratamientos con y sin recirculación de la solución nutritiva, pero usando tezontle como sustrato en un periodo de 29 días de trasplante a final de cosecha y 7.3 kg por m² con hidroponía profunda, esto en un periodo de 24 días de trasplante a fin de cosecha.

Con esto sería posible establecer hasta 15 ciclos por año, lo que daría, un potencial de producción de 109.5 kg·m⁻²·año⁻¹ usando un sistema de hidroponía profunda.

Las lechugas que fueron sometidas a los tratamientos con y sin recirculación de la solución nutritiva en los dos ciclos de producción (Ciclo 1: Primavera y Ciclo 2: Verano), mostraron 10 días de diferencia en el tiempo de trasplante a cosecha. En experimentos realizados en condiciones controladas, en cultivares de lechuga se ha demostrado que el tiempo requerido para obtener plantas de tamaño comercializable disminuye a medida que aumenta la radiación solar incidente (Cracker y Seibert, 1983).

Como se observa en los Cuadros 6 y 7, las lechugas que se cultivaron en primavera, presentaron un peso fresco promedio de 187.36 g, que fue menor con respecto a las que se cultivaron en verano con un promedio de 222.57 g. Un comportamiento similar se tuvo en peso seco de la planta. Lo anterior coincide con lo indicado por Stepowska y Kowalczyk (2001), en lechuga mantequilla que se cultivó en primavera bajo lana de roca con una CE de 1.7 dSm^{-1} . Estos autores reportaron un peso fresco de 236 g y el contenido de materia seca tuvo una equivalencia de 7.1 %, mientras que la lechuga que se manejó en la estación de otoño al tener la misma CE, el peso fresco tuvo un valor de 136 g y el contenido de materia seca tuvo un valor de 5 %. Lo anterior se debe a que la cantidad de luz cambia en un ciclo con respecto al otro, y como consecuencia la actividad de nitrato reductasa disminuye su actividad (Valverde *et al.*, 2009).

En ambos ciclos 1 y 2, el diámetro de cabeza fue significativamente mayor en hidroponía profunda que en el sistema con y sin recirculación de la solución nutritiva y el largo de hoja en hidroponía profunda también fue mayor que en sistema sin recirculación de solución nutritiva solo en ciclo 1. En ancho de hoja, no hubo ninguna diferencia significativa entre tratamientos en cada ciclo de cultivo. (Cuadros 8 y 9).

Cuadro 8. Comparación de medias entre tratamientos para las variables que se indican en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 1.

TRATAMIENTO	Diámetro de cabeza (cm)			
	16 ddt	23 ddt	32 ddt	39 ddt
T1 (SR)	13.16 b ^z	19.98 b	22.80 b	29.33 a
T2 (CR)	11.48 c	18.57 c	23,00 b	29.46 a
T3 (HP)	17.66 a	25.17 a	31.96 a	-
DMS	1.2	0.91	0.96	1.86

TRATAMIENTO	Largo de hoja (cm)			
	16 ddt	23 ddt	32 ddt	39 ddt
T1 (SR)	-	-	18.90 b	-
T2 (CR)	-	-	19.25 ab	-
T3 (HP)	-	-	20.20 a	-
DMS			1.21	

TRATAMIENTO	Ancho de Hoja (cm)			
	16 ddt	23 ddt	32 ddt	39 ddt
T1 (SR)	-	-	14.89 a	-
T2 (CR)	-	-	14.80 a	-
T3 (HP)	-	-	14.75 a	-
DMS			1.00	

^z Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$; DMS=Diferencia mínima significativa; SR: Sin recirculación; CR: Con recirculación y HP: Hidroponía profunda.

Cuadro 9. Comparación de medias entre tratamientos para las variables que se indican en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo 2.

TRATAMIENTO	Diámetro de Cabeza (cm)			
	10 ddt	17 ddt	24 ddt	29 ddt
T1(SR)	20.77 b ^z	26.78 b	30.80 b	33.76 a
T2(CR)	20.92 b	28.86 ab	31.28 b	33.44 a
T3(HP)	23.80 a	30.04 a	35.48 a	-
DMS	2.08	2.66	2.47	1.34

TRATAMIENTO	Largo de Hoja (cm)			
	10 ddt	17 ddt	24 ddt	29 ddt
T1(SR)	-	-	19.3 a	-
T2(CR)	-	-	19.5 a	-
T3(HP)	-	-	19.7 a	-
DMS	-	-	1.44	-

TRATAMIENTO	Ancho de Hoja (cm)			
	10 ddt	17 ddt	24 ddt	29 ddt
T1(SR)	-	-	14.80 a	-
T2(CR)	-	-	14.35 a	-
T3(HP)	-	-	15.22 a	-
DMS	-	-	1.284	-

^z Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$; DMS=Diferencia mínima significativa; SR: Sin recirculación; CR: Con recirculación y HP: Hidroponía profunda.

El mayor diámetro de cabeza en el tratamiento de hidroponía profunda se presume que fue por una modificación de la disposición foliar, asociada a un cierto movimiento heliotrópico, probablemente causado por aumento de la radiación solar reflejada, por la cubierta plástica de color blanco (Gonella *et al.* 2003) y por disminución de la variación térmica de la solución nutritiva dado que la energía térmica reflejada se pierde por la ventilación dentro del invernadero.

El comportamiento del peso fresco, peso seco y diámetro de cabeza a lo largo del ciclo del cultivo, también se aprecian en la Figura 7 para el ciclo 1 y Figura 8 para el ciclo 2.

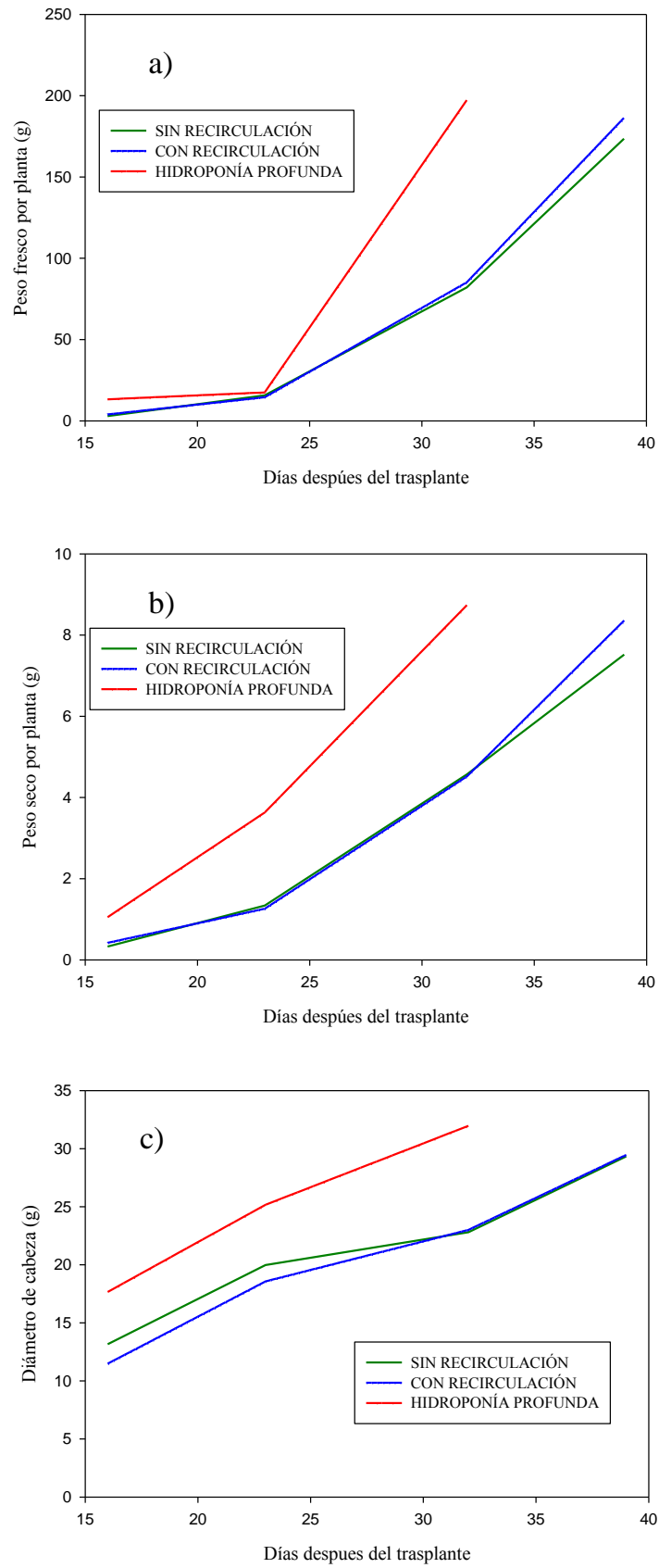


Figura 7. Desarrollo de peso fresco (a), peso seco (b) y diámetro de cabeza (c) de plantas de lechuga cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos, en el ciclo 1.

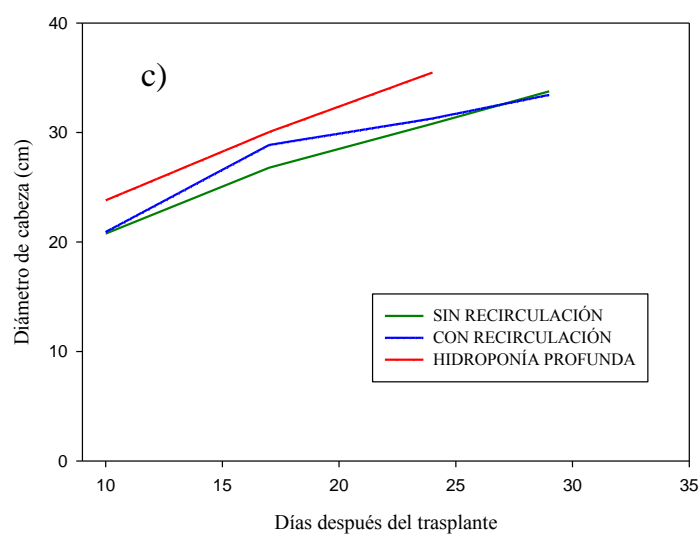
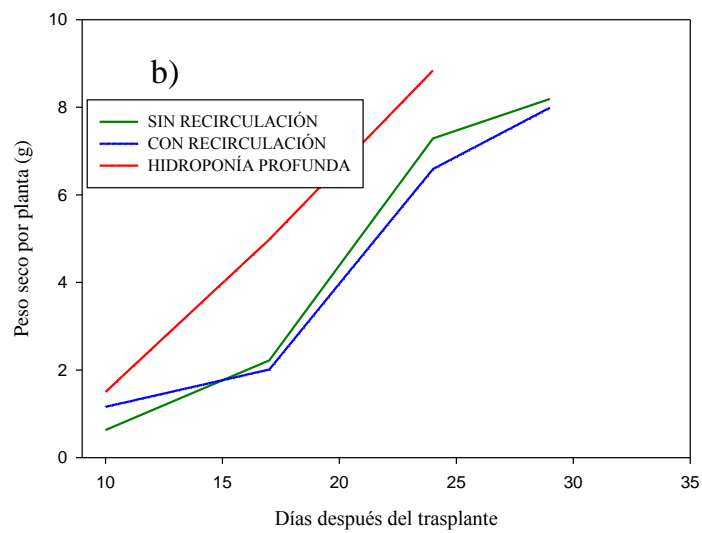
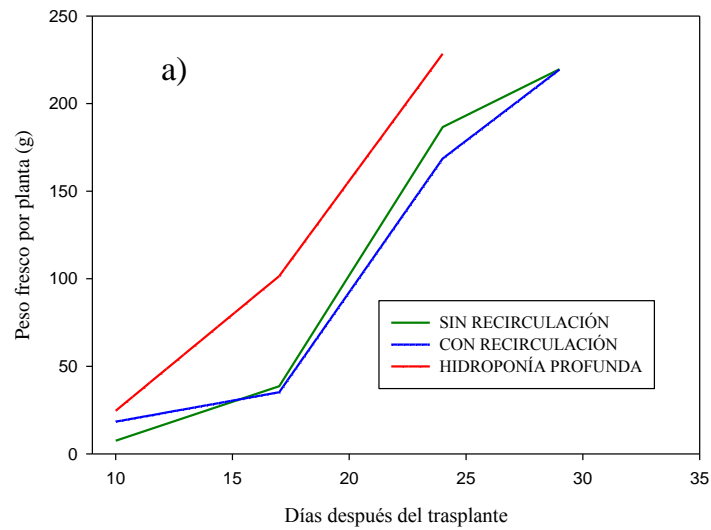


Figura 8. Desarrollo de peso fresco (a), peso seco (b) y diámetro de cabeza (c) de plantas de lechuga cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos, en el ciclo 2.

4.2. Comportamiento del pH de la solución nutritiva drenada

Para el primer ciclo, el pH drenado en los tratamientos sin y con recirculación tuvieron una tendencia ascendente conforme transcurrieron los días después del trasplante, con un valor mínimo de 8.062 y máximo de 9.232. En el caso del tratamiento de hidroponía profunda, el pH osciló entre 5.58 y 6.84 de manera ascendente (Figura 9a). Este se debe a que se favoreció la absorción de cationes como el Ca^{++} y K^{+} , lo que se refleja en los análisis químicos en la solución de drenaje en los dos ciclos de producción para ambos tratamientos. Canavas (1999), menciona que al tener pH altos se ve reducida la absorción de aniones, además de que la planta cuando absorbe cationes libera iones OH^{-} , lo que alcaliniza el medio y por tanto los drenajes tienden a aumentar su pH. En el tratamiento de hidroponía profunda se puede observar que el consumo aparente de Ca^{++} y K^{+} fue menor con respecto a los tratamientos anteriormente mencionados (Cuadro 12 y 13), ya que Canavas (1999) menciona que a pH bajos se ve reducida la absorción de cationes y por lo tanto la concentración de OH^{-} se reduce en la solución nutritiva donde se desarrolla el cultivo.

El pH de entrada en los sistemas en los tratamientos fue de 5.9 y 5.8 para el ciclo 1 y 2, respectivamente, y el porcentaje de sobreriego aplicado fue del 20 % aproximadamente. En el sistema con y sin recirculación de la solución nutritiva, la diferencia en el pH de entrada respecto a las salidas, fue de hasta 3.3. Es posible que esta diferencia se pueda minimizar dando un poco más de sobreriego.

En el ciclo 2, la solución drenada de los tratamientos sin recirculación y con recirculación mostraron valores de pH mínimo de 8.033 y un valor máximo

de 8.68, mientras que en el tratamiento de hidroponía profunda el valor de pH osciló entre 5.36 y 6.66 (Figura 9b). Este valor de pH que se manejó en el tratamiento de hidroponía profunda es el adecuado para el cultivo de lechuga (Carrasco, 2004).

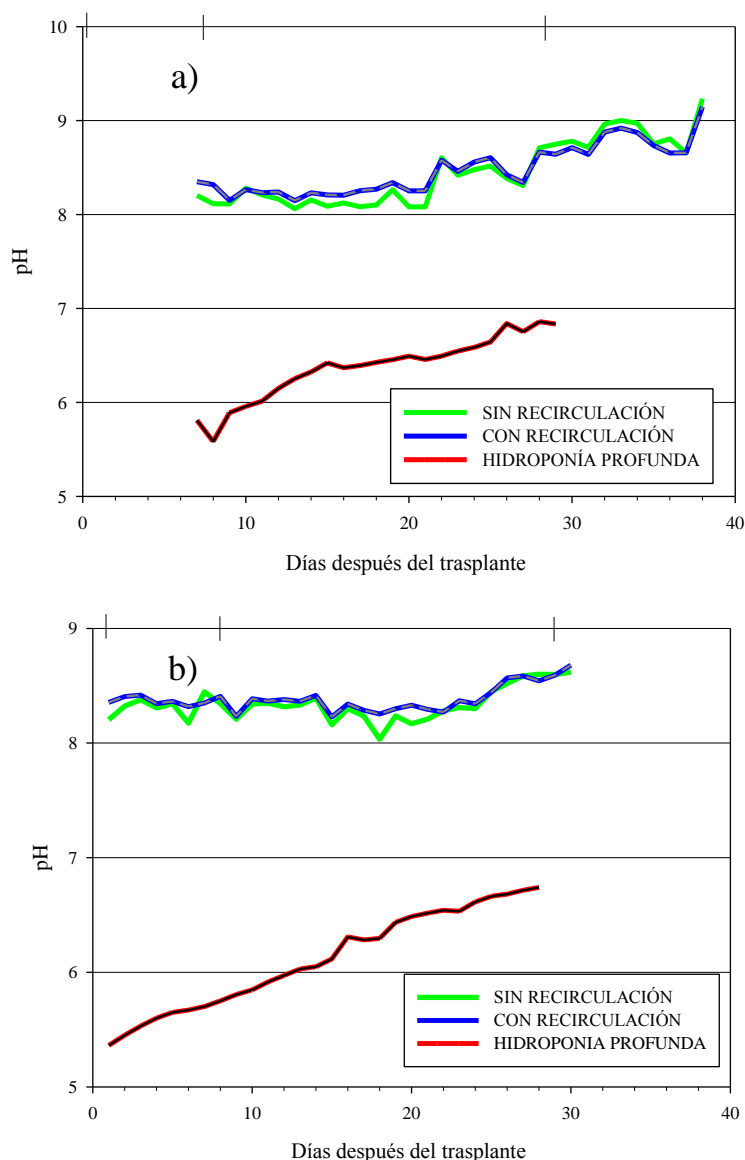


Figura 9. Comportamiento del pH en el drenaje a través del tiempo para cultivo de lechuga tipo mantequilla en el ciclo 1 (a) y ciclo 2 (b).

4.3. Comportamiento de la Conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva lixiviada

La CE de la solución nutritiva de entrada manejada en los tres tratamientos fueron de $1.8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. En los lixiviados de los tratamientos sin recirculación y

con recirculación de solución nutritiva, este valor ascendió con el avance del ciclo de cultivo con un valor mínimo de 0.58 y un máximo de 1.98 dS·m⁻¹, mientras que para el tratamiento de hidroponía profunda el valor de CE disminuyó de 2.36 a 1.78 dS·m⁻¹ (Figura 10a). Lo anterior se puede explicar por la existencia de una mayor evapotranspiración que trae como consecuencia una acumulación progresiva de sales en el sustrato, lo que provoca que cuando aplicamos solución nutritiva con una conductividad de 1.8 dS·m⁻¹, esta arrastra parte de las sales que vienen en el sustrato y que depositan en el lixiviado y con ello un aumento progresivo de la CE del mismo (Castellanos, 2000).

La disminución de la CE de la solución nutritiva en el tratamiento de hidroponía profunda, se debió a que en este sistema el agua que se perdía por el consumo de las plantas, era sustituida constantemente con agua pura (sin fertilizantes) para mantener un volumen constante en el contenedor.

En el ciclo 2, el comportamiento de la CE fue la misma que en el ciclo 1 y los valores oscilaron de 0.31 y un valor máximo de 0.946 dS·m⁻¹ en los sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva, y en hidroponía profunda de 2.22 a 1.60 dS·m⁻¹ (Figura 10b).

Van der Boon *et al.* (1988) al estudiar dos ciclos de producción de lechuga, uno en primavera y otro en verano encontraron que al aumentar la conductividad eléctrica de 1.27 a 3.1 dS·m⁻¹, el rendimiento de lechuga disminuyó, cuando manejaron NO₃⁻ como fuente nitrógeno. Estos mismos autores encontraron que la conductividad eléctrica en la solución nutritiva que permite un mayor rendimiento en el cultivo de lechuga oscila entre 1.6 a

2.13 dS·m⁻¹, que coincide con los valores de la solución que se manejó en el tratamiento de hidroponía profunda del presente estudio.

Es importante resaltar que en ambos ciclos de evaluación, que mientras para los tratamientos sin recirculación y con recirculación la CE aumenta conforme transcurre el ciclo de cultivo, en el caso del tratamiento con hidroponía profunda la CE disminuye a lo largo del ciclo.

La mayor absorción nutrimental para cultivo de lechuga en condiciones de hidroponía, se da cuando la conductividad eléctrica en la solución tiene valores que oscilan entre 1.5 a 1.8 dS·m⁻¹, ya que la presión osmótica que ejerce la raíz bajo estas condiciones, favorece una mayor absorción de nutrimentos (Hadid *et al.*, 1996).

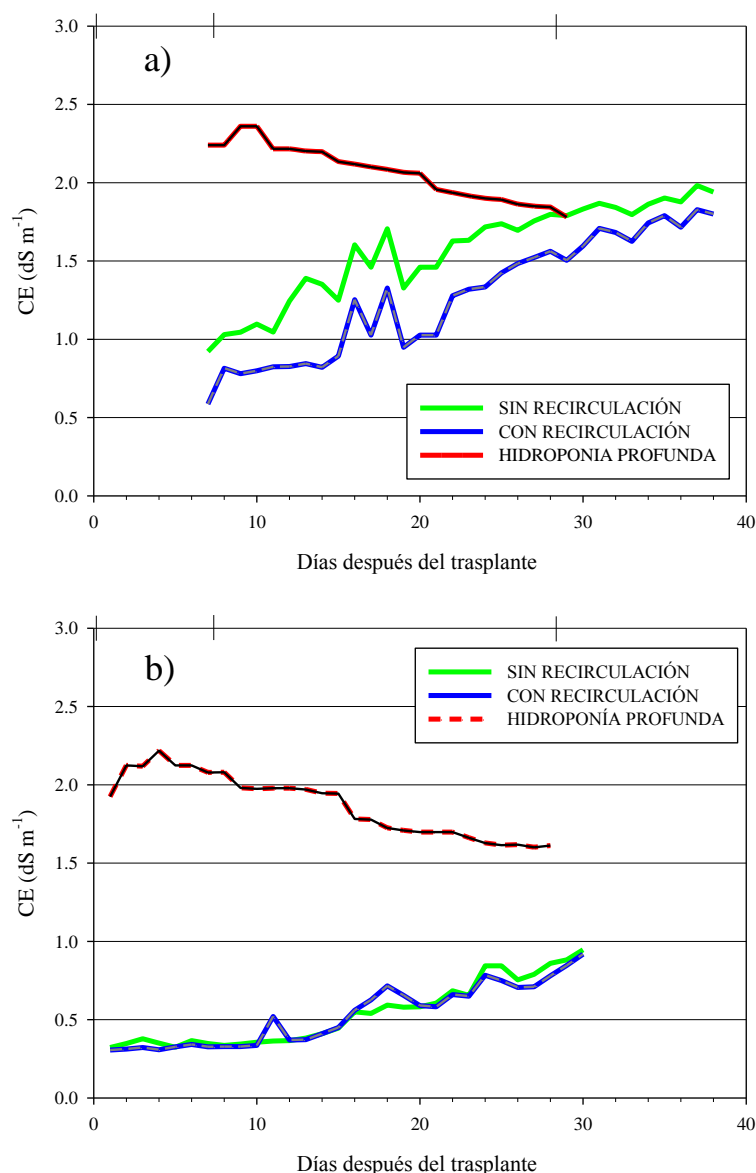


Figura 10. Comportamiento de la CE en el drenaje a través del tiempo para cultivo de lechuga tipo mantequilla en el ciclo 1 (a) y en el ciclo 2 (b).

También se conoce que la conductividad eléctrica, tiene un efecto sobre un mayor rendimiento y mejor calidad de cosecha, al aumentar los niveles de clorofila, mayor absorción de fósforo, potasio, hierro y manganeso cuando se manejan conductividades entre 1.5 a $1.8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ (Hadid *et al.*, 1996).

4.4. Temperatura del ambiente de la raíz

En el ciclo 1 de evaluación, la temperatura ambiente de la raíz, para los sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva varió de 14.4 a 28°C

con una media de 20 °C (Figura 11a) y en hidroponía profunda de 18 a 24 °C, con una media de 21 °C (Figura 11b). De acuerdo con Jaques (2005), la temperatura óptima para el cultivo de lechuga es de 18 a 23 °C, condición similar ocurrió cuando el cultivo en hidroponía profunda. Por su parte Thompson *et al.* (1998) señalan que la temperatura adecuada en la raíz que favorece la mayor acumulación de materia seca es de 24 °C.

Cabe señalar que la variación entre la temperatura máxima y mínima en el sistema en balsas, fue menor que cuando se utilizó tezontle como sustrato.

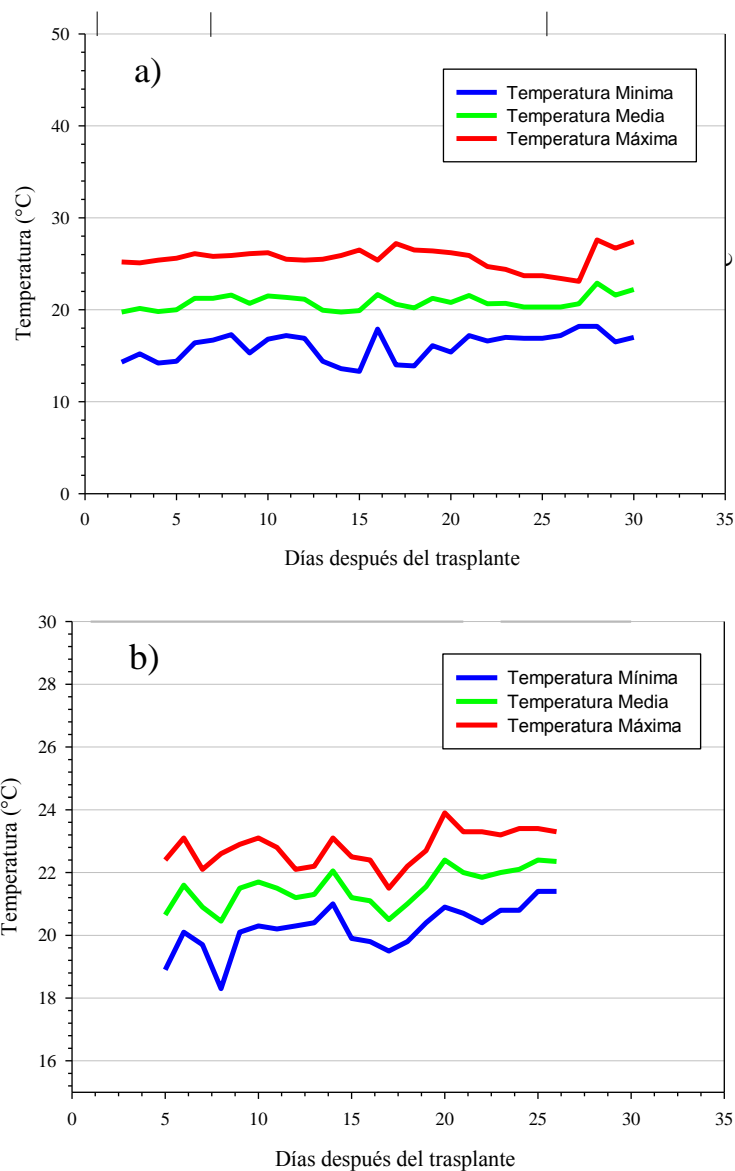


Figura 11. Variación de la temperatura en el sustrato para los tratamientos sin y con recirculación (a), hidroponía profunda (b). Ciclo 1.

Lo mismo ocurrió en el ciclo 2, solamente que este caso, las temperaturas registradas fueron ligeramente mayores respecto a las del primer ciclo debido a la época del año en que se hizo en cada experimento. Es de resaltar que en ambos ciclos, la temperatura de la raíz en hidroponía profunda fue muy uniforme y favorable a lo largo del ciclo de cultivo (Figura 12a y 12b).

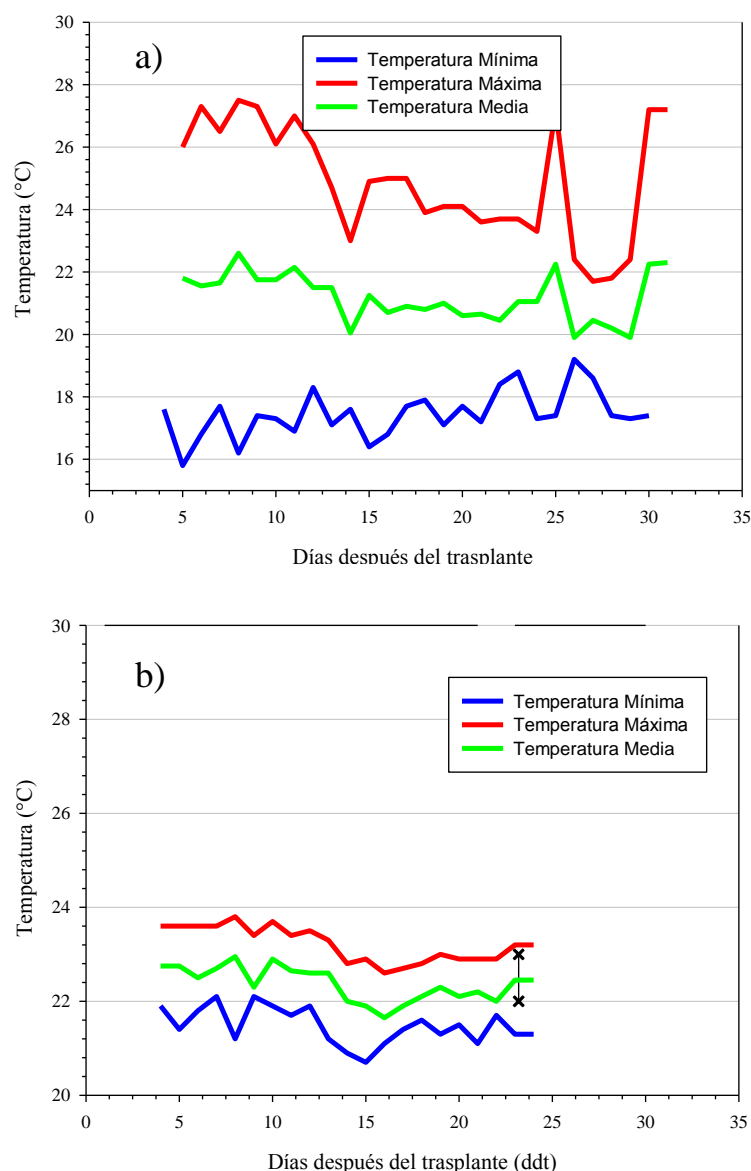


Figura 12. Variación de la temperatura en el sustrato para los tratamientos sin y con recirculación (a), hidroponía profunda (b). Ciclo 2.

4.5. Consumo de agua y nutrientes minerales

4.5.1. Consumo de Agua

En el primer ciclo, el consumo de las plantas en el sistema de recirculación de la solución nutritiva presentó un patrón de consumo variable a lo largo del ciclo de producción (Figura 13). Esto puede deberse a la variación de temperaturas altas que el sustrato tuvo a lo largo de todo el ciclo, las cuales oscilaron entre 22 y 27 °C en algunas ocasiones donde el consumo diario

por planta fue de 0.155 L. El pico de mayor consumo de agua se tuvo a los 5 ddt.

En el sistema sin recirculación de la solución nutritiva, el consumo promedio por planta fue de 0.166 L (Figura 13) y muy similar al del tratamiento con recirculación, que también varió a lo largo del ciclo.

En cambio en hidroponía profunda, el patrón de consumo de agua fue muy similar a lo largo de todo el ciclo con una ligera tendencia de mayor consumo conforme avanza el ciclo (Figura 14), con un consumo de agua por planta solamente de 0.079 L. El consumo uniforme de agua puede deberse a que las condiciones ambientales de la solución nutritiva (temperatura, pH y CE) fueron también más estables en este sistema.

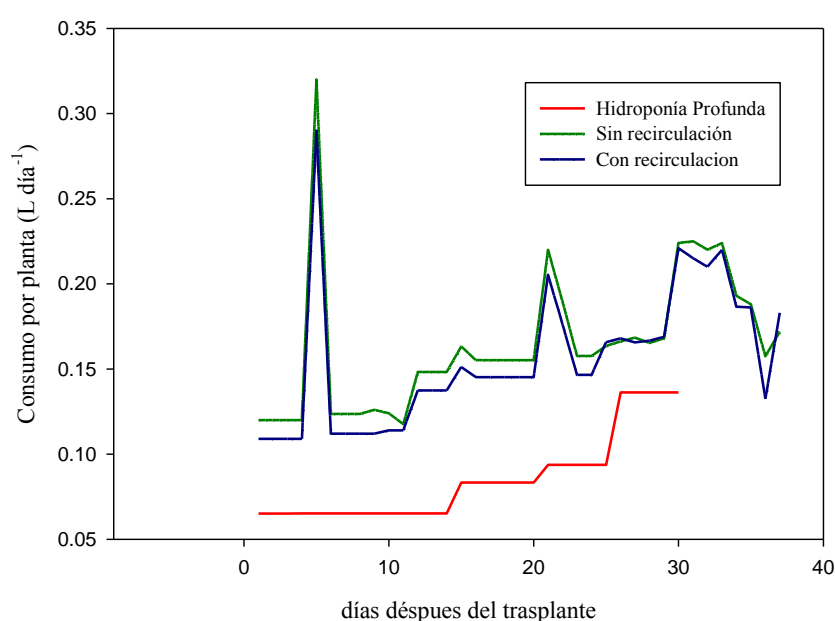


Figura 13. Consumo de agua por planta en lechuga tipo mantequilla para los tres sistemas hidropónicos. Ciclo 1.

En el ciclo 2, en ambos sistemas con y sin recirculación, se tuvieron el mismo patrón de absorción de agua, pero en este caso, hubo un pico de

mayor absorción a los 22 ddt (Figuras 14), y el consumo de agua por planta fue ligeramente menor que en primer ciclo, sobre todo en el sistema sin recirculación de la solución nutritiva que en promedio se tuvo una absorción de 0.110 L por planta.

Con hidroponía profunda, la absorción de agua también fue similar al ciclo 1, El consumo promedio de trasplante a cosecha por planta fue solamente de 0.074 L (Figura 13). Este resultado muestra claramente el ahorro de agua que se puede tener en la producción de lechuga usando un sistema hidroponía profunda.

El mayor consumo de agua por planta para el tratamiento T1 y T2 con respecto al T3 para ambos ciclos de producción, se explica porque con una mayor frecuencia de riego se contribuye a un mejor control en la concentración de sales y con ello se mejora la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas llegando con ello a dar mejores rendimientos (Savvas *et al.*, 2007).

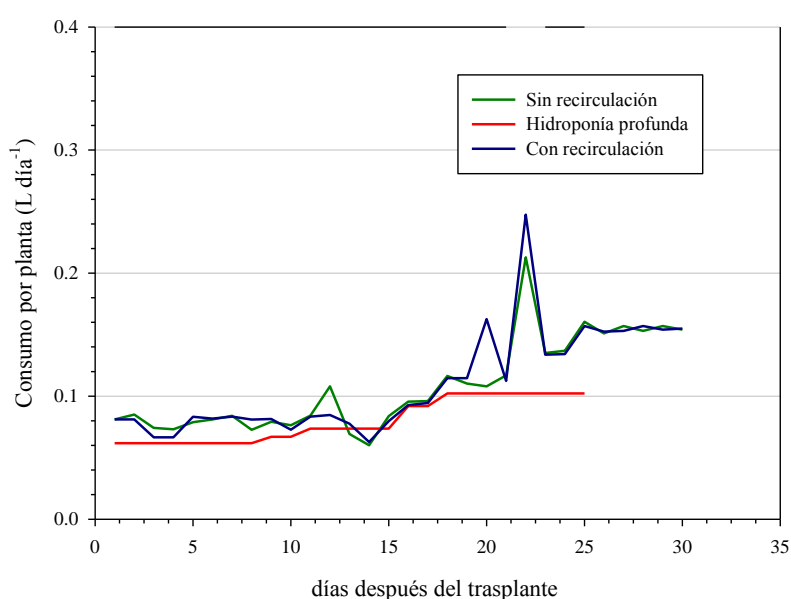


Figura 14. Consumo de agua por planta en lechuga tipo mantequilla para los tres sistemas hidropónicos.Ciclo 2.

El ahorro de agua en el ciclo 1 presentó su valor más alto para el tratamiento de hidroponía profunda con un valor de 40 %, seguido del tratamiento con recirculación, donde el ahorro fue de 27.7 %, respecto a un sistema sin recirculación de la solución nutritiva (Cuadro 10).

En el ciclo 2, el ahorro de agua para el tratamiento de hidroponía profunda fue un poco menor (26.21 %) lo mismo que en el tratamiento con recirculación de solución nutritiva (12.4 %) como se observa en la Cuadro 11. Resultados muy similares a los de Dhakal *et al.*, (2005).

Cuadro 10. Patrones de gastos y ahorros de agua para lechuga tipo mantequilla con diferentes sistemas de producción en el ciclo 1.

Mantecquilla con diferentes sistemas de producción en el ciclo 1.							
Tratamiento	Volumen aplicado	Desechado		Consumo del cultivo		Ahorro	Rendimiento
	-----Agua-----						
	(L·m ⁻²)	(L·m ⁻²)	(%)	(L·m ⁻²)	(L·planta ⁻¹)	(%)	(Kg·m ⁻²)
Sistema Abierto	100	26.32*	26.32	73.68 ^z	2.30	-	5.55
Sistema Cerrado	96.18	23.89	22.98	72.29	2.23	27.70 ^y	5.96
Hidroponía Profunda	263.97	204.68	77.54	59.29	1.85	40.00	6.31

* Volumen calculado con el porcentaje de drenaje. ^z consumo = volumen aplicado – volumen desechado. ^y ahorro con respecto al sistema abierto.

Cuadro 11. Patrones de gastos y ahorros de agua para lechuga tipo mantequilla con diferentes sistemas de producción en el ciclo 2.

Tratamiento	Volumen aplicado	Desechado		Consumo del cultivo		Ahorro	Rendimiento
		-----Agua-----					
	(L·m ⁻²)	(L·m ⁻²)	(%)	(L·m ⁻²)	(L·planta ⁻¹)	(%)	(Kg·m ⁻²)
Sistema Abierto	89.18	14.32*	12.77	74.86 ^z	2.33	-	7.03
Sistema Cerrado	90.43	12.3	11.12	78.13	2.44	12.39 ^y	7.02
Hidroponía Profunda	264.63	198.83	75.14	65.80	2.01	26.21	7.31

* Volumen calculado con el porcentaje de drenaje. ^z consumo = volumen aplicado – volumen desechado. ^y ahorro con respecto al sistema abierto.

4.5.2. Consumo de nutrimentos

El gasto de nutrimentos para el tratamiento con recirculación de la solución nutritiva, en el ciclo de primavera muestra que el mayor consumo aparente en nutrimentos es de potasio y nitrógeno en forma de NO_3^{-1} (Cuadro 12), mientras que para el ciclo de verano, todos los nutrimentos que contenía la solución nutritiva fueron consumidos por la planta. Esto puede ser explicado porque la solución de drenaje en verano tiene un aumento menos progresivo del pH y de CE con respecto al ciclo de primavera (Cuadro 12). El mayor ahorro de nutrimentos se tuvo en NO_3^{-1} y Ca^{++} con un total de ahorro de fertilizantes de 10.5 % en promedio en ambos ciclos con respecto al sistema abierto.

Para el tratamiento de hidroponía profunda en el primer ciclo, el mayor consumo lo presentó el potasio, seguido del fósforo, mientras que en el ciclo 2, los nutrimentos que presentan mayor absorción fueron el potasio y el nitrato; sin embargo, se observa que existe una mayor absorción de nutrimentos en el verano con respecto a primavera (Cuadro 13). Si se comparan ambos tratamientos se puede observar que el consumo aparente es mayor en el sistema con recirculación con respecto al de hidroponía profunda (Cuadro, 12); sin embargo, el rendimiento es menor en el sistema con recirculación de la solución nutritiva comparado con respecto al de hidroponía profunda, lo que permite inferir que la mayor parte de las sales se retienen en el sustrato, por lo que el sistema más eficiente es el tratamiento de hidroponía profunda.

Cuadro 12. Consumo de Nutrientes para el tratamiento de recirculación de solución nutritiva. Ciclo 1.

Nutriente	Tratamiento	Nutriente aplicado	Desechado		Consumo aparente del cultivo ^x	Ahorro ^y	Rendimiento
		(g·m ⁻²)	(g·m ⁻²)	(%)	(g·m ⁻²)	(%)	(Kg·m ⁻²)
K ⁺	Sin recirculación	17.54	4.62*	26.34	-	-	5.6
	Con recirculación	16.8	1.5 ^z	8.93	15.3	12.7	5.9
	Hidroponía Profunda	9.1	2.4 ^z	26.37	6.7	61.8	6.3
Ca ⁺⁺	Sin recirculación	14.04	3.69	26.28	-	-	5.6
	Con recirculación	13.5	4.5	33.33	9	35.89	5.9
	Hidroponía Profunda	7.3	5.5	75.34	1.8	87.17	6.3
N-NO ₃ ⁻	Sin recirculación	14.04	3.69	26.28	-	-	5.6
	Con recirculación	13.5	3.7	27.41	9.8	30.19	5.9
	Hidroponía Profunda	7.3	6.1	83.56	1.2	91.4	6.3
P	Sin recirculación	4.21	1.107	26.29	-	-	5.6
	Con recirculación	4.2	0.1	2.38	4.1	2.61	5.9
	Hidroponía Profunda	2.2	0.1	4.55	2.1	50.11	6.3

* valor estimado con el porcentaje de drenaje. ^z valor estimado con los análisis al momento de ajustar la solución nutritiva. ^xconsumo aparente = aplicado – drenado (considerando que una parte queda retenida en el sustrato y/o precipita); ^yahorro con respecto al sistema abierto.

Cuadro 13. Consumo de Nutrientes para el tratamiento de recirculación de solución nutritiva. Ciclo 2.

Nutriente	Tratamiento	Nutriente aplicado	Desechado		Consumo aparente del cultivo ^x	Ahorro ^y	Rendimiento
		(g·m ⁻²)	(g·m ⁻²)	(%)	(g·m ⁻²)	(%)	(Kg·m ⁻²)
K ⁺	Sin recirculación	15.9	2.5*	15.7	-	-	5.6
	Con recirculación	15.8	0.1 ^z	0.6	15.7	1.3	5.9
	Hidroponía Profunda	14.8	2.0 ^z	13.5	12.8	19.5	6.3
Ca ⁺⁺	Sin recirculación	12.48	2.0	16.0	-	-	5.6
	Con recirculación	12.7	0.3	2.3	12.4	0.6	5.9
	Hidroponía Profunda	7.3	2.5	34.2	4.8	62.2	6.3
N-NO ₃ ⁻	Sin recirculación	12.48	2	16.0	-	-	5.6
	Con recirculación	12.7	0.3	2.3	12.4	0.6	5.9
	Hidroponía Profunda	7.3	1.3	17.8	6	51.9	6.3
P	Sin recirculación	3.8	0.6	15.7	-	-	5.6
	Con recirculación	3.8	0.0	0.00	3.8	0.0	5.9
	Hidroponía Profunda	2.2	0	0.00	2.2	42.1	6.3

* valor estimado con el porcentaje de drenaje. ^z valor estimado con los análisis al momento de ajustar la solución nutritiva. ^xconsumo aparente = aplicado – drenado (considerando que una parte queda retenida en el sustrato y/o presipita); ^yahorro con respecto al sistema abierto.

La mayor absorción de NO₃⁻¹ en lechuga ocurre cuando el pH se incrementa (Gonella. *et. al.* 2003). En los sistemas que se basan en el uso de un sustrato sólido, se pierden más rápidamente agua y como consecuencia su pH aumenta, con lo que la absorción de NO₃⁻¹ se favorece. La mayor absorción de nitrógeno, fósforo y potasio en lechuga se relaciona con una mayor cantidad de luz en verano con respecto a primavera (Falovo *et al.* 2009). El consumo de nutrientes para lechuga tipo mantequilla en un

sistema con recirculación de nutrimentos por día por planta en promedio a lo largo del año es de 8 a 16 mg de NO_3^- , de 2 a 5.5 mg de P y de 11.5 a 23 mg de K^+ (Schippers, 1980), resultados que parcialmente coinciden con los del presente experimento ya que para el fósforo el patrón de consumo fue un poco diferente. Considerando todos los fertilizantes aplicados y de la evaluación de los dos ciclos de cultivo, en promedio el ahorro de fertilizantes en sistema de hidroponía profunda fue del orden de 50 % con respecto al sistema abierto.

5. CONCLUSIONES

1. El crecimiento y rendimiento de lechuga fueron similares entre los sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva.
2. En el sistema con recirculación de la solución nutritiva, se obtuvo un ahorro de 20 % de agua y 10.5 % en nutrimentos (K, Ca, N-NO_3^- y P), comparado con los sistemas sin recirculación.
3. Con el sistema de producción en hidroponía profunda se tuvo el mayor rendimiento (6.8 kg m^{-2}) y precocidad de cosecha de hasta 7 días, con un ahorro de agua de 33 % y fertilizantes de 50 %, con respecto al sistema sin recirculación de la solución nutritiva.

6. LITERATURA CITADA

- ANANDA, D.; AHUNDENTYA, W. 2000. Effect of different hydroponic systems and media on growth of lettuce (*Lactuca Sativa*) under protected culture. Journal Science Food Agricultural 59:140-150.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. 2002. Salt accumulation and distribution in a greenhouse soil as affected by salinity of irrigation water and leaching management. Engineer Agriculture y Enviroment 6: 414-419.
- BUGBEE, B. 2004. Nutrient Management in Recirculating Hvdroponic Culture. Acta Horticulturae 648: 99-112.
- CANAVAS, M. F. 1999. Sistemas hidropónicos, pp. 223-244. *In*: Cultivo sin suelo 2. Curso de especialización superior, FERNANDEZ F., M.; CUADRADO G., I. M. (eds.). Caja Rural de Almería. Andalucía, España.
- CARRASCO, S. G; IZQUIERDO, G. J. 1996. La empresa de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante ("NFT"). Ed. FAO. Talca. Chile. 60 p.
- CARRASCO S. G. 2004. Sistema NFT, requerimientos y usos, pp. 541-554. *In*: Tratado de cultivo sin suelo. 1ª Ed. URRESTARAZU G., M. (ed.). Editorial Mundi Prensa. Almería, España.
- CASTELLANOS, R. J. Z. 2004. Manual de Producción de Hortícola en Invernadero. INTAGRI. Celaya Gto. México. 469 p.

- CASTAÑEDA, M. R.; VENTURA, R. E.; PENICHE, V. R. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero. *Agrociencia* 41(03): 317-355.
- CHAPMAN, H. D.; PRATT, P. E. 1973. Método de análisis de suelos, plantas y agua. Ed. Trillas. México, D. F. 195 p.
- CIAMPITTI, A. I.; GARCIA, O. F. 2004. Requerimientos nutricionales absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios de hortalizas, frutales y forrajes. Internacional Plant Nutrition Institute. Buenos Aires Argentina. pp. 1-4.
- CRACKER, L. E.; SEIBERT, M. 1983. Light and the development of lettuce. *Journal of Plant Science* 63: 277-281.
- DHAKAL U.; TANTAN, H. J.; SALOKHE, M. V. 2005. Development of a greenhouse nutrient recycling system for tomato production in humid tropics. *Agricultural and Engineering International* 7: 1-15.
- FALLOVO, C.; YOUSSEF, R.; REA, E.; BATTISTELLI A. 2009. Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *acephala* in floating raft culture. *Journal Science Food Agricultural* 89:162-189.
- FAO. 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org> fecha de consulta: 22/Mayo/2011.
- FREZZA, D.; LEON, A.; LOGEGARAY, V.; CHIESA, A. 2005. Soilles culture technology for high quality lettuce. *Acta Horticulturae* 697: 43-48.

- GARCIA G., E.; LEAL, P. M.; GONZALEZ, J. E. 2007. Evaluación de dos sistemas hidropónicos (abierto y cerrado) con relación al uso de solución hidropónica reciclada y producción de jitomate de exportación. *Revista Tecnóloga* 1(2): 54-66.
- GIUFFRIDA, F.; LEONARDI, C. 2009. Nutrient solution concentrations in soilless closed system. *Acta Hort.* 807: 463-468
- GONELLA, M.; SEIIO, F., CONVERSA, P.; SANTAMARINA, P. 2003. Yield and quality of lettuce grown in floating system using different sowing density and plant spatial arrangements. *Acta Horticulturae* 614:687-692.
- GUTIÉRREZ, M.; ALEGRET, S.; CÁCERES, R.; CASADESÚS, J.; MARFÁ, O.; VALLE DEL, M. 2007. Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture* 57: 12-22.
- HADID A., F.; LMONIEM E., M.; SHINAWY M., Z.; ELSOUD M., A. 1996. Electrical conductivity effect on growth and mineral composition of lettuce plants in hydroponic system. *Acta Horticulturae* 434: 59-66.
- HEE P, M.; BEOM L. Y. 2001. Effects of CO₂ concentration, light intensity and nutriment level on growth of leaf lettuce in the a plant factory. *Acta Horticulturae* 548: 377-383.
- HUANG, W. Y. 2009. Factors Contributing to the Recent Increase in U.S. Fertilizer Prices, 2002-08. *Agricultural Resources Situation and Outlook Number AR-33*. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, DC. 21 p.

- IKEDA, H.; KOOHAKAN, P.; TANIMNUM, J. 2002. Problems and Countermeasures in the Re-Use of the nutrient Solution in Soilless Production. *Acta Horticulturae*. 578: 211-219.
- JAKUES, H. C.; HERNANDEZ, M. J. L. 2005. Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*. 3(1):11-16.
- LAMAS, N. M. A. 2011. Rentabilidad y financiamiento para la agricultura protegida. Fideicomisos instituidos en relación con la agricultura, (FIRA). Expo Agro Sinaloa.
- LIANG, W.; JIANG, Y.; ZHANG, Y. 2006. Accumulation of soil soluble salt in vegetable greenhouses under heavy application of fertilizers. *Agric. J.* 1: 123-127.
- MACIAS M., A. 2010. Competitividad de México en el mercado de frutas y hortalizas de Estados Unidos de América. *Agroalimentaria* 16(31): 31-48.
- MAGAN, C. J. J. 1999. Sistemas de cultivo en sustrato: A solución perdida y con recirculación de lixiviado, pp. 189-207. *In: Cultivo sin suelo 2, Curso de especialización superior*. FERNANDEZ, F. M.; CUADRADO, G. I. M. (eds.). Caja Rural de Almería. Andalucía, España.
- MAROTO, B. J. V. 2000. Botánica (taxonomía y fisiología) y adaptabilidad, pp. 28-41. *In: La lechuga y la escarola*. 1ª Ed. MAROTO, B. J. V.; MIGUEL, G. A.; BAIXAULI, S. C. (eds.). Mundi Prensa S. A. Madrid, España.

- MASSA, D.; INCROCCI, L.; MAGGINI, R.; CARMASSI, G., CAMPIOTTI, C. A.; PARDOSSI, A. 2010. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultura of greenhouse tomato. *Agric. Water Manage* 97: 971-980.
- OHTA K.; ITO N.; HOSOKI T.; HIGASHIMURA H. 1991. Influence of the concentrations of nutrient solution salt supplement on quality and yield of cherry tomato grown hydroponically. *Journal of the Japanese Society for Horticulture Science* 60: 89-95.
- PÁEZ, O. F.; RAMÍREZ, R. G.; RUIZ, F. A. C.; SOTO, J. M. F. 2007. Contaminación por nutrientes de las aguas costeras, pp. 55-67. *In: La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Serie lagunas costeras de Sinaloa.* Universidad Autónoma de México.
- PÉREZ, G. M.; MÁRQUEZ, S. F.; PEÑA, L. A. 1997. Mejoramiento Genético de Hortalizas. Ed. UACH. Chapingo, México. 380 p.
- PREMUZIC, Z.; PALMUCCI, H. E.; NAKAMA, M. 2007. Chlorination: Phytotoxicity and effects on the production and quality of *Lactuca sativa* var. Mantecosa grown in a closed, soil-less system. *Phyton* 76: 103-107.
- RESH M., H. 1992. Cultivos Hidropónicos. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp. 95-178.
- RYDER, E.J. 1986. Lettuce breeding. pp. 433-474 *In: Breeding Vegetable Crops*, M.J. Bassett.(ed). AVI Publishing Westport. New York, United States.

- SAGARPA. 2007. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2007. http://www.sagarpa.gob.mx/desarrollo_rural/agronegocios fecha de consulta: 23/Marzo/2007.
- SÁNCHEZ, DEL C. F.; ESCALANTE, R. E. R. 1988. Hidroponía. 3ª ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.
- SAVVAS, D.; SIGRIMIS, N.; CHATZIEUSTRATIOU, E.; PASCHALIDIS, C. 2009. Impact of a progressive Na and Cl accumulation in the root zone on pepper grown in a closed-cycle hydroponic system. *Acta Horticulturae* 807: 451-456.
- SAVVAS, D.; STAMATI, E.; TSIROGIANNIS, I. L.; MANTZOS, N.; AROUCHAS, P. E.; KATSOULAS, N.; KITTAS, C. 2007. Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems. *Agricultural Water Management*. 91: 102-111.
- SCHIPPERS, A. P. 1980. Composition changes in the nutrient during the growth of plants in recirculating nutrient culture. *Acta Horticulturae* 98: 103-117.
- SCUDERI, D.; GIUFFRIDA, F.; Noto, G. 2009. Effects of nutrient solution EC on yield, quality and shelf-life on lettuce grown in floating system. *Acta Horticulturae* 807: 221-226.
- SIAP. 2009. Servicio de Información Agroalimentaria y Pecuaria. <http://www.siap.gob.mx/sistemasproducto/agriculturaprotegida.pdf> fecha de consulta: 24/Mar/2009.

SIAP. 2010. Servicio de Información Agroalimentaria y Pecuaria.
http://www.siap.gob.mx/sistema_productos fecha de consulta:
24/Mar/2010.

STEPOWSKA A. J.; KOWALCZYK W. 2001. The effect of growing media on yield and nitrate concentration in Lettuce (*Lactuca sativa* var, *capitata* L.). Acta Horticulturae 548: 503-509.

TAKAHASHI, K. 1984. Injury by continuous cropping in vegetables: various problems in the cultivation using grafted plants. Yasai Shikenjo Kenkyu Shiryo 18: 87-89.

THOMPSON C., H.; LANGHANS, W. R.; BOTH, J. A.; ALBRIGHT, D. L. 1998. Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic. Journal of the Horticultural Science 123 (3): 361-364.

TÜZEL, I. H.; TUNALI, U.; TÜZEL, Y.; ÖZTEKIN, G. B. 2009. Effects of salinity on tomato in a closed system. Acta Hort. 807: 457-462.

URRESTARAZU G., M.; SALAS S., C. 2004. Sistemas con sustrato y recirculación de la disolución nutritiva, pp. 362-420. *In*: Tratado de cultivo sin suelo. 2ª Ed. URRESTARAZU G., M. (ed.). Mundi Prensa S. A. Madrid, España.

URRESTARAZU, G. M. 2004. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo, pp. 3-47. *In*: Tratado de cultivo sin suelo. 2ª Ed. URRESTARAZU G., M. (ed.). Mundi Prensa S. A. Madrid, España.

USDA. 2007. United States Department of Agriculture.
<http://www.nal.usda.gov/fiiic/foodcompData/> fecha de consulta:
21/Enero/2011.

VALVERDE K.; CHANG M.; RODRIGUEZ D., A. 2009. Effect of the Light Quality on the Nitrate Reductase Activity in Lettuce Plants Grown in NFT. *Acta Horticulturae* 98: 89-96.

VAN OS, E. A. 2009. Comparison of Some Chemical and Non-Chemical Treatments to Disinfect a Recirculating Nutrient Solution. *Acta Hort.* 843: 229-234.

VAN DER BOON, J.; STEENHUIZEN, J. W.; STEINGROVER, E. 1988. Effect of EC, and Cl^{-1} and NH_4^{+} concentration of nutrient solutions on nitrate accumulation in lettuce. *Acta Horticulturae* 222: 35-42.

ZANIN, G.; PONCHIA, G; SAMBO, P; ORTEGA, E. A. 2009. Seasonal effects on production of radish and lamb's lettuce grown in a floating system. *Acta Horticulturae* 893: 35-42.

ZEKKI, H.; GAUTHIER, L.; GOSSELIN, A. 1996. Growth, productivity and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121: 1082-1088.