

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



**Empleo de Agua Residual Urbana en el Diagnostico Nutricional de Lechuga
Hidropónica (*Lactuca sativa L.*)**

Por:

ELISEO CERÓN POLVADERA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Empleo de Agua Residual Urbana en el Diagnostico Nutricional de Lechuga
Hidropónica (*Lactuca sativa L.*)

Por:

ELISEO CERÓN POLVADERA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por:



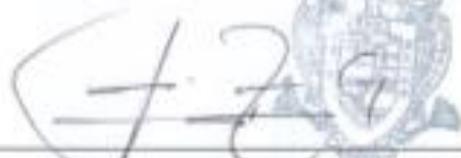
Dr. Ricardo Requejo López
Asesor Principal



Dr. Edmundo Peña Cervantes
Coasesor



Universidad Autónoma Agraria
"Antonio Narro"
Dr. José Antonio González Fuentes
Coasesor



M.C/ Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la División de Ingeniería
Saltillo, Coahuila, Mexico

Diciembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Señor, te doy gracias, porque sin Ti nada se hubiera realizado. Ahora guíame con tu espíritu y no me sueltes de tu mano para ser un profesional honesto, leal y de servicio. Gracias Jesús, por caminar a mi lado.

A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, MI ALMA MATER, por haberme cobijado durante cuatro años formándome profesionalmente, brindándome grandes virtudes que me llevaron a ser una gran persona. Mis ideales me llevarán a lugares desconocidos, con la firme convicción de que a mi Alma Mater siempre la llevaré con orgullo.

AI DR. RICARDO REQUEJO LÓPEZ, por el gran apoyo brindado y aporte de conocimientos en el desarrollo de este trabajo así como su tiempo, paciencia y consejos para concluirlo.

AL DR. EDMUNDO PEÑA CERVANTES, por su tiempo, paciencia, asesoramiento en la realización de este trabajo.

AL DR. JOSE ANTONIO GONZÁLEZ FUENTES, por su valiosa colaboración y tiempo en la revisión de este trabajo.

A todos mis profesores de mi ALMA MATER, que en el lapso de mi estancia en la Universidad contribuyeron en gran medida en mi formación académica.

A mis amigos y compañeros de la carrera de **Ingeniero Agrícola y Ambiental** por haberme brindado su amistad (Catalina, Mariza, Víctor, Rubén y Rolando). A mis amigos del dormitorio Porfirio número 18 quienes fueron mi segunda familia. A todas aquellas personas que confiaron en mí. Mil gracias.

DEDICATORIA

A mis padres

Epifanio Cerón Dajüi y Apolonia Polvadera Cathí.

Este trabajo es dedicado a mis padres ya que ellos me han hecho saber que una de sus ilusiones es mi éxito. Deseo corresponder a los sacrificios que han hecho por mí. Es mi voluntad compartir con ellos este objetivo logrado. Así mismo, agradezco los valores inculcados y su confianza depositada en mis proyectos. Manifiesto el gran amor y la admiración que siento por ellos.

A mis Abuelas:

Guadalupe Dajüi(+), Juana Dajüi y Rosa Polvadera, a quienes les debo todo lo que soy. Con enseñanzas me mostraron el mundo de una mejor manera. Me dieron lo más preciado que tengo, a mis Padres.

A mis hermanos:

Omar, Gladys y Ariel, por la fortuna de ser su hermano mayor y por brindarme su cariño y felicidad. Ustedes serán parte fundamental en el logro de mis objetivos.

A mi novia:

Erika Jaqueline Landeros Ureste, por estar siempre conmigo apoyándome en todo momento para culminar un sueño más. Por compartir parte de su vida a mi lado.

A mis grandes amigos de la Comunidad de Vázquez en Ixmiquilpan, Hidalgo, quienes siempre me motivaron para alcanzar este sueño.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
Objetivos generales	2
Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
Concepto de agua residual	5
Criterios de calidad del agua	6
Desinfección por tratamiento por ozono	6
Ventajas de la ozonización	7
Desventajas de la ozonización	7
Rayos ultravioleta (UV)	8
Ventajas de la radiación ultravioleta (UV)	8
Desventajas de la radiación ultravioleta (UV)	9
Lixiviado de Lombricomposta (LL)	9
Ventajas del empleo de lixiviado de lombricomposta (LL)	10
Sistema raíz flotante.....	10
Inyección de aire	10
Oscuridad en las raíces	11
Potencial de hidrogeno (pH) en la soluciones nutritivas	11
Conductividad Eléctrica (CE) en las soluciones hidropónicas	12
III. MATERIALES Y MÉTODOS	13
Ubicación del área de estudio	13
Materiales	13
Métodos	14
Diseño de tratamientos.....	14

Producción de las plántulas	14
Métodos de desinfección del agua empleados	15
Formulación de soluciones nutritivas	15
Formulación de solución nutritiva al 100%.....	16
Preparación de solución nutrimental al 75% + 25% de (LL)	18
Calculo de la solución a complementar con el 25% de (LL)	18
Diagnostico nutricional. Desviación del optimo porcentual (DOP)	19
Establecimiento del experimento.....	21
Análisis Estadístico.....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
Análisis de Varianza	24
Consumo de agua	25
Diámetro del tallo	25
Longitud de raíz fresca	25
Longitud de follaje fresco	26
Peso fresco de raíz	27
Peso fresco de follaje	28
Peso seco raíz	29
Peso seco de follaje	29
Resultados del método de desviación del optimo porcentual (DOP).	31
pH y Conductividad eléctrica	34
V. CONCLUSIONES	35
VI. LITERATURA CITADA	36
VII. CONSULTAS REALIZADAS EN INTERNET	38

INDICE DE CUADROS

Cuadros	Nombres	Páginas
	Cuadro 1. Valores del análisis del agua utilizada en el experimento	15
	Cuadro 2. Solucion para lechuga empleada en el trabajo (Cadahia, 1998)....	16
	Cuadro 3. Aportes en la formulación de la solución nutritiva al 100%.	16
	Cuadro 4. Diseño de la solución empleada	16
	Cuadro 5. Fertilizante necesario para 270 litros de solución nutritiva.....	17
	Cuadro 6. Fuentes de microelementos y cantidades necesarias para 90 litros de solución nutritiva	17
	Cuadro 7. Fertilizante necesario para elaborar 270 litros de solución al 75% de concentración y complementada con 25% de líquido de lombricomposta	19
	Cuadro 8 . Fuentes de microelementos y cantidades necesarias para 90 litros de solución al 75% de concentración y complementada con 25% de líquido de lombricomposta ..	19
	Cuadro 9. Diseño y distribución de tratamientos en la investigación.....	22
	Cuadro 10. Cuadros medios para tratamientos al agua, concentración de solución y aireación, repeticiones, error experimental y coeficiente de variación para las variables evaluadas en el experimento	24

Cuadro 11. Cuadrados medios para tratamiento al agua, concentración de solución y aireación, repeticiones, error experimental y coeficiente de variación para los valores de eficiencias en la absorción nutrimental 30

Cuadro 12. Tabla de resultados de análisis de DOP para cada uno de los tratamientos establecidos..... 31

INDICE DE FIGURAS

Figuras	Nombres	Páginas
	Figura 1. Consumo porcentual de agua mundial por sectores.....	1
	Figura 2. Mapa de localizacion del sitio experimental	13
	Figura 3. Plántula de lechuga a trasplantar	21
	Figura 4. Efecto de los tratamientos en el diametro del tallo.....	25
	Figuras 5 y 6. Efecto de los tratamientos en la longitud de raíz fresca	26
	Figura 7. Efecto de los tratamientos en la longitud de follaje fresco	27
	Figuras 8 y 9 Efecto de los tratamientos en el peso fresco de raíz	27
	Figuras 10 y 11 Efecto de los tratamientos en el peso fresco de follaje	28
	Figuras 12 y 13. Efecto de los tratamientos en peso seco de follaje	29

RESUMEN

El trabajo se realizó en un micro túnel localizado en el área experimental del Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) de Saltillo, Coahuila, México. Dada la escasez de agua en las regiones semiáridas de nuestro país, se realizó un diagnóstico nutricional del cultivo de lechuga cultivada en agua residual urbana en un sistema hidropónico de raíz flotante. Se emplearon dos métodos de desinfección de agua (ozono y rayos ultravioleta UV). Se manejaron dos soluciones nutritivas SN (solución al 100% y solución al 75% más 25% de líquido de lombricomposta LL) en condiciones de aireación ó sin ella.

Para esto se produjeron plántulas de lechuga variedad "Great Lakes". Se utilizó agua de la Planta Tratadora de Aguas Residuales operada por la SEMARNAC, ubicada en la Escuela Forestal de Saltillo. Se desinfectó el agua residual con la inyección de ozono y con el empleo de rayos ultravioleta (UV), en el tratamiento con ozono se trató el agua por 24 horas. En el tratamiento con UV se les aplicó por un lapso de 30 minutos. Un tercer tratamiento fue el testigo, que no llevó ningún proceso (ST). Se consideraron 12 tratamientos generados por un factorial (3X2X2) con tres repeticiones.

Tratamientos	Agua Residual	Aireacion	Soluciones
1	UV	Sin airear	75%
2	UV	Aireación	75%
3	UV	Aireación	100%
4	UV	Sin airear	100%
5	Sin Tratar	Sin airear	75%
6	Sin Tratar	Aireación	75%
7	Sin Tratar	Aireación	100%
8	Sin Tratar	Sin airear	100%
9	Ozono	Sin airear	75%
10	Ozono	Aireación	75%
11	Ozono	Aireación	100%
12	Ozono	Sin airear	100%

El orden de requerimiento siguiente: Cu>P>Zn>K>Mn>Ca>Fe>Mg fue el que predominó en el diagnóstico nutricional realizado a los tratamientos, teniendo al tratamiento 8 como el de mejor balance nutricional,

Palabras clave: hidroponía, agua residual urbana, diagnóstico nutricional, lechuga.

I. INTRODUCCIÓN

Casi toda el agua de nuestro planeta se encuentra bajo la forma de agua salada en los océanos. Solo tres por ciento de los recursos hídricos globales son aguas dulces, dos tercios de los cuales provienen de la nieve y de los hielos polares y de las regiones montañosas; por lo tanto, el agua dulce constituye solo cerca del uno por ciento de los recursos hídricos totales.

La mayor parte de esta se encuentra como agua subterránea mientras que menos del dos por ciento se encuentra en ríos y lagos. En los climas húmedos y templados, cerca del 40 por ciento de la precipitación termina en agua subterránea y en los climas mediterráneos esta cifra se reduce a 10-20 por ciento. En los climas realmente áridos se puede reducir virtualmente a cero.

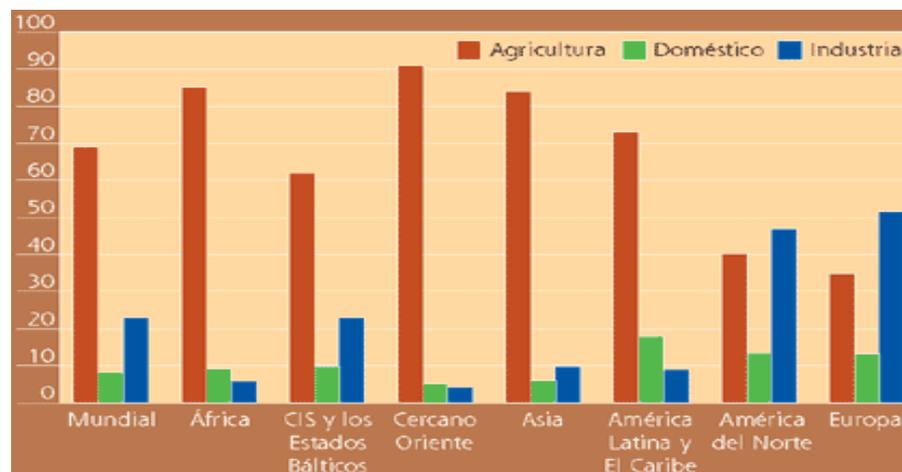


Figura 1. Consumo porcentual de agua mundial por sectores.

Fuente: http://www.fao.org/docrep/005/Y3918S/y3918s03.htm#P0_0

Aunque puede hacerse mucho para incrementar la relación entre los rendimientos de los cultivos y el agua utilizada en la agricultura de secano, actualmente, los mayores esfuerzos se dirigen a la agricultura bajo riego, que depende principalmente del agua superficial de los ríos o del agua subterránea de los acuíferos. Muchos países en desarrollo dependen extremadamente del riego. En un estudio de la FAO realizado en 93 países en desarrollo, se observó que en 18 de

ellos la agricultura de regadío ocupa más del 40 por ciento del área cultivable; otros 18 países riegan entre el 20 y el 40 por ciento de su área cultivable (FAO, 2014).

A lo largo de la historia, la calidad del agua ha sido un factor determinante del bienestar humano, la mayor preocupación sobre la seguridad del agua es ahora la presencia potencial de contaminantes químicos. Estos pueden incluir productos químicos orgánicos e inorgánicos y metales pesados, procedentes de fuentes industriales, agrícolas y de la escorrentía urbana. Algunos de los metales pesados que están entre los dañinos debido a su toxicidad para los humanos son el plomo y el estaño (Manahan, 2007).

En nuestro país el problema de desabasto de agua se ha incrementado notablemente, se sabe que el sector agrícola es el mayor usuario de los recursos hídricos tomados en su conjunto, por ejemplo, de la lluvia (llamada agua verde) y del agua en los ríos, lagos y acuíferos (llamada agua azul). A nivel mundial las actividades agrícolas consumen alrededor del 70 por ciento del total, el sector doméstico un 10 por ciento y las labores industriales un 21 por ciento (FAO, 2005), lo anterior obliga a las instituciones de investigación, enseñanza, atención y capacitación a los productores agrícolas el estudiar la problemática para plantear soluciones al respecto. La reutilización de aguas residuales de uso doméstico podría ser una alternativa viable. En hidroponía se podrían producir cultivos hortícolas de crecimiento rápido como la lechuga.

Objetivos generales.

- ✓ Evaluar el desarrollo de lechuga en agua residual tratada con ozono, rayos UV y sin tratar.
- ✓ Analizar el efecto de soluciones nutritivas solas y enriquecidas con lixiviados de lombricomposta en el crecimiento y desarrollo de lechuga.
- ✓ Estudiar el efecto de la aireación en la solución nutritiva sobre el crecimiento de lechuga
- ✓ Establecer un orden de requerimiento nutricional en lechuga.

Hipótesis.

- ✓ Los tratamientos de sanidad y de aireación a la solución nutritiva, provocarán respuestas diferentes en el crecimiento y desarrollo de lechuga.
- ✓ Debido a que el líquido de lombricomposta incrementará el efecto nutritivo de las soluciones hidropónicas, las lechugas crecidas en este tratamiento tendrán las mejores respuestas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Menciona Samperio (2005), que el termino hidroponía procede de las palabras griegas hydros (agua) y ponos (cultivo, labor). Un método de cultivo de plantas en un medio que no es el tradicional (en tierra), sino artificial, y que se basa en aplicar en la práctica la teoría de que los minerales son la principal alimentación de los vegetales.

Resh (2001), señala que el término Hidroponía como tal, fue acuñado en 1929 por William F. Gericke profesor de la Universidad de California. "Hidroponía" significa "agua que trabaja"

Woodward (1699) citado por Resh, cultivó por primera vez plantas sin tierra, en tres recipientes del mismo tamaño introdujo tres plantitas de menta, llenó el primer recipiente con agua de lluvia, otro con agua del Támesis y el ultimo con agua sucia de un canal, mezclada además con tierra. La última no correspondía a una solución nutritiva como hoy en día se conoce, pero agradó a la planta que aventajó considerablemente en su crecimiento a las otras dos plantas. El profesor Woodward llego a la conclusión de que los vegetales no solo se componen de agua, ni esta les basta como alimento único.

Schubert (1981), dice que hay 5 factores principales, los cuales han de actuar conjuntamente para que las plantas a nuestro cuidado prosperen: la luz, el aire, el calor, el agua y las sustancias alimenticias. Las técnicas de producción son muy variables y en los últimos años ha tomado auge hacerlo bajo condiciones de invernadero e hidroponía (cultivo sin suelo), con el fin de obtener mayor rendimiento y calidad, por lo que los países desarrollados ven en ella una alternativa económica para automatizar y programar su agricultura intensiva, principalmente en aquellos cultivos que se cotizan en el mercado, como hortalizas, flores y plantas de ornato.

Lara (2000), establece que los factores de la solución nutritiva que tienen mayor influencia en la producción en hidroponía son: la relación mutua entre los aniones, la relación mutua entre los cationes, la concentración de nutrimentos (CE), la relación $\text{NO}_3:\text{NH}_4$, el pH y la temperatura. No existe una solución nutritiva que sea apropiada para cualquier condición.

Resh (2001), menciona que de todos los métodos de cultivo sin suelo, el cultivo en agua, por definición, es el auténtico cultivo hidropónico. Las raíces de las plantas están suspendidas en un medio líquido (solución de nutrientes), mientras que, a partir de la corona o cuello radicular, las plantas se mantienen en una cama muy fina de medio inerte.

Concepto de agua residual.

Aguas residuales son las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. (NOM-001-SEM-1999).

Criterios de calidad del agua.

La calidad del agua es de gran importancia en los cultivos hidropónicos. El agua con un contenido de cloruro sódico de 50 ppm no es aconsejable para obtener un desarrollo óptimo de las plantas. La dureza del agua es una medida del contenido en ion carbonato (CO_3^{-2}) y conforme aumenta la dureza, el pH incrementa (Resh, 2001).

Samperio (2005), menciona que el agua para el cultivo debe reunir algunas características, entre ellas, la limpieza de la fuente de agua. Se puede desinfectar el agua y la solución nutritiva colocando a la entrada del sistema de riego una lámpara emisora de luz ultravioleta (UV), se evita así la proliferación de virus, bacterias entre otros patógenos.

Las actividades de desinfección son consideradas como los mecanismos principales en la desactivación o destrucción de los organismos patógenos para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua. Es muy importante que las aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de realizarse las actividades de desinfección para que esta acción sea eficaz.

Se deberá realizar un análisis químico del agua para conocer sus cantidades en macro y micro elementos. Se tendrá así el dato preciso de la cantidad de cada mineral para calcular la solución nutritiva. (Resh, 2001).

Desinfección por tratamiento por ozono (O_3).

El ozono (O_3) es más destructivo frente a los virus que el cloro, oxida a los contaminantes del agua directamente a través de la reacción con O_3 e indirectamente generando el radical hidroxilo (OH), que es un reactivo oxidante fuerte. Desafortunadamente, la solubilidad del ozono en el agua es relativamente baja, lo cual limita su poder desinfectante. La oxidación directa de la pared celular constituye su principal modo de acción. Esta oxidación provoca la rotura de dicha pared,

propiciando así que los constituyentes celulares salgan al exterior de la célula. Asimismo, la producción de radicales hidroxilo como consecuencia de la desintegración del ozono en el agua, provoca un efecto similar al expuesto, causando daños a los constituyentes de los ácidos nucleicos (ADN y ARN). Provoca la ruptura de enlaces carbono-nitrógeno, lo que da lugar a una despolimerización.

En el caso del hierro, el contenido en Fe-DTPA puede llegar a disminuir un 34 por ciento a pH 6 y un 15 por ciento a pH 4, tras una hora de tratamiento con ozono. Esto puede variar en función del quelato empleado, siendo el EDDHA la forma más estable bajo las mismas condiciones. Este inconveniente se produce con mayor intensidad cuando se exceden las dosis adecuadas, perdiendo además, eficacia el tratamiento. Con el manganeso, pueden aparecer precipitados en la solución hidropónica, que pueden llegar a ser del orden del 20 al 50 por ciento (Correa, 2006).

Ventajas de la ozonización.

- ✓ El ozono es más eficaz que cloro en la desinfección o destrucción de virus y bacterias.
- ✓ No existen residuos peligrosos que deban ser removidos después de la ozonización. El ozono se descompone rápidamente.
- ✓ Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente.

Desventajas de la ozonización.

- ✓ La baja dosificación quizás no desactive algunos virus, esporas o quistes.
- ✓ La ozonización es una tecnología más compleja que la cloración o la desinfección con luz ultravioleta, por lo que se requieren equipos y sistemas de eficientes.
- ✓ El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiere de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.

Rayos ultravioleta (UV)

Mohyuddin (1985) citado por Resh (2001), menciona que el esterilizador de ultravioleta (UV) redujo significativamente o eliminó los siguientes hongos de las soluciones acuosas: Botrytis cinérea, Cladosporium sp, Fusarium spp, Sclerotinia sclerotiorum, Verticillium albo-atrum entre otras.

Se tiene conocimiento que la infección de Pythium en las raíces produce atrofia en las plantas. La esterilización UV de las soluciones nutritivas no combate este organismo. Solo se puede controlar por esterilización entre cosechas de todas las camas, tuberías, etc., con una solución con cloro al 10 por ciento. <http://huertohidroponicocch.jimdo.com/m%C3%A9todo-ra%C3%ADz-flotante/>

El sistema de desinfección con luz UV transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo (ADN o ARN). Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, esta destruye la habilidad de reproducción de la célula.

La radiación UV generada por una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio, penetra al material genético de los microorganismos y retarda su habilidad de reproducción. La longitud de onda óptima para desactivar eficazmente los microorganismos se encuentra en el rango de 250 a 270 nm. http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-064.pdf

Ventajas de la radiación ultravioleta (UV).

- ✓ La desinfección con luz UV es eficaz para la desactivación de la mayoría de virus, esporas y quistes.
- ✓ No hay efecto residual que afecte a los seres humanos o cualquier organismo acuático.
- ✓ La desinfección con luz UV es de uso fácil para los operadores.

- ✓ La desinfección con luz UV tiene un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes (aproximadamente de 20 a 30 segundos con la utilización de las lámparas de baja presión).
- ✓ El equipo de desinfección con luz UV requiere menos espacio que otros métodos.

Desventajas de la radiación ultravioleta (UV).

- ✓ La baja dosificación puede no desactivar algunos virus, esporas y quistes.
- ✓ La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/L.

Lixiviado de lombricomposta (LL).

El lixiviado de lombricomposta o exfoliante, como también se le conoce, es un líquido que resulta del filtrado del agua por la irrigación constante en las camas o canteros donde se encuentran las lombrices, el cual se infiltra, corre y es recogida en determinados contenedores (Barreiro, 2012).

Sobre los efectos del humus, Howard (1947) señala: El efecto del humus sobre las plantas puede ser muy profundo. La planta toma un aspecto que se asemeja a la personalidad, el follaje cobra apariencia característica, las hojas adquieren el brillo de la salud, las flores desarrollan en sus colores tonos profundos, los diminutos caracteres morfológicos de la planta en conjunto se hacen más agudos y más claros. El desarrollo de las raíces es abundante, las raíces activas muestran no solamente turgencia, sino también un estado floreciente.

Ventajas del empleo de lixiviado de lombricomposta (LL).

- ✓ Contiene hormonas, como los ácidos indolacético y giberélico que estimulan el crecimiento, desarrollo y las funciones vitales de la planta.
- ✓ Favorece el mejoramiento y la conservación del suelo.
- ✓ Da protección a la raíz de bacterias, hongos y nematodos.

Sistema de raíz flotante.

Sistema hidropónico por excelencia por que las raíces de las plantas están sumergidas en solución hidropónica. Este sistema es muy utilizado en proyectos de hidroponía social en diferentes países latinoamericanos generalmente para producir cultivos de hojas. Dependiendo del medio en el que se desarrollan las raíces, los sistemas de cultivo sin suelo se pueden clasificar en tres grupos: cultivos en sustrato, cultivos en agua y cultivos en aire (Aeropónico).

Inyección de aire.

De acuerdo con Remy (2005), la cantidad de este elemento debe ser mayor a 3,2 mg/l para que las plantas de lechuga puedan crecer sanas y vigorosas.

La oxigenación es también muy importante para la planta, en su función de transportar nutrientes y acumular elementos dentro de su sistema celular. El oxígeno, al oxidar los minerales, se convierte en el catalizador para generar la energía metabólica mediante su sistema de respiración radical. La presencia de raíces de color oscuro es un indicador de una mala oxigenación de la solución nutritiva y esto limita la absorción de agua y nutrientes, afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas.

En la técnica hidropónica, la forma de oxigenación está ligada al sistema de cultivo que se adopte, el suministro de oxígeno en forma natural puede lograrse tan solo con permitir que haya un espacio entre la parte inferior del sostén de las plantas

y la superficie de la solución nutritiva; así se contribuye a que las raíces superiores estén rodeadas de aire húmedo, y a que las inferiores estén sumergidas en la solución nutritiva. Mientras más agitada esté el agua, mayor será el contenido de oxígeno disuelto (Resh, 2001).

La medida de oxígeno disuelto (OD) indica la cantidad de oxígeno disponible en la solución nutritiva del estanque para que las raíces lleven a cabo la respiración. La lechuga crece satisfactoriamente en un nivel de OD de por lo menos 4 ppm. Si no se añade oxígeno, los niveles de OD caerán hasta prácticamente 0 ppm. La falta de oxígeno en la solución nutritiva detendrá el proceso de respiración y dañará seriamente a la planta (Malca, 2001).

Oscuridad en las raíces.

Las plantas pueden funcionar normalmente si sus raíces están expuestas a la luz del día siempre que exista un 100 por ciento de humedad relativa; no obstante, la luz dará lugar al crecimiento de las algas, lo cual interferirá con el crecimiento de las plantas ya que originará una competencia en la toma de nutrientes, reducirá la acidez de la solución, creará malos colores, competirá con el oxígeno durante la noche e introducirá productos tóxicos (Resh, 2001).

Potencial de hidrógeno (pH) en las soluciones nutritivas.

Cadahía (2005), menciona que la asimilabilidad de los elementos nutritivos es afectada de modo marcado por el pH. Con pH de 5,0 a 6,5 la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilabilidad. Por debajo de pH=5,0 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg y B, mientras que por encima de pH=6,5 pueden disminuir la asimilabilidad de P, Fe, Mn, B, Zn, y Cu. Los óxidos metálicos de Fe, Mn, Cu, Zn se hacen más solubles al bajar el pH (por debajo de 5,0), pudiendo llegar a resultar tóxicos.

En lo referente a su pH, la lechuga está clasificada como una hortaliza ligeramente tolerante a la acidez, siendo su rango de pH de 5.8 a 6.0. Ciertos autores afirman que se desarrolla mejor en pH ácidos (Valadez, 1990).

Conductividad eléctrica (CE) en las soluciones hidropónicas.

La concentración total de iones en la zona de la raíz se relaciona con la demanda del cultivo en sistemas hidropónicos y se expresa como conductividad eléctrica (CE). Cada fertilizante contribuye de manera diferente a incrementar la CE de la solución nutritiva. La contribución a la CE de la disolución no depende de los fertilizantes disueltos, sino de los iones que se producen tras su disolución. La magnitud de esta contribución dependerá de las características específicas del ión correspondiente y de la proporción que éste tenga en la propia disolución.

Una ecuación recomendada para estimar la CE en soluciones nutritivas dentro del intervalo de 1.5 a 4.0 dsm^{-1} es la siguiente: $\text{CE} = \text{suma de cationes}/10$, donde los cationes vienen expresados en meqL^{-1} y la CE en dsm^{-1} .

El incremento en la salinidad afecta la absorción y transporte de nutrimentos en la planta. La alta presión osmótica disminuye el estado hídrico de la planta, la corriente transpiratoria, el flujo de masas y en consecuencia el transporte de nutrimentos, especialmente del Ca y B (Díaz, 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio.

El presente trabajo se realizó en un micro túnel ubicado en el área experimental del Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Se localiza entre las coordenadas geográficas 25° 22" de latitud norte y 101° 02" longitud oeste y a una altitud de 1742 msnm. El clima es muy seco, semi-cálido, con invierno fresco, extremoso, con lluvias en verano y una precipitación invernal superior al 10 por ciento del total anual. La precipitación anual de 350-400 mm. El mes con lluvias más abundante es julio, marzo es el mes más seco (Valadez, 2011).



Figura 2. Mapa de localización del sitio experimental.

Materiales.

- ✚ Charola germinadora de 200 cavidades.
- ✚ Semillas de lechuga variedad (Great Lakes).
- ✚ Peat moss.
- ✚ Perlita.
- ✚ Agua residual.

- ✚ Contenedores con capacidad de 5 litros.
- ✚ Bomba generadora de ozono (MORE-ZON10).
- ✚ Lámpara UV (STERLIGHT COPPER MODELO SC1).
- ✚ Líquido de lombricomposta.

Métodos.

Diseño de tratamientos.

Se emplearon tres tipos de agua residual (agua sin tratar (ST), agua tratada con radiación ultravioleta (UV), agua tratada con ozono (O₃) y con dos soluciones (solución nutritiva al 100%, solución nutritiva al 75% + 25% de líquido de lombricomposta LL). Se evaluó el airear y no airear las soluciones nutritivas.

Se consideraron 12 tratamientos generados por un arreglo factorial con tres repeticiones, estos se describen a continuación.

Tratamientos	Agua Residual	Aireacion	Soluciones
1	UV	Sin airear	75%
2	UV	Aireación	75%
3	UV	Aireación	100%
4	UV	Sin airear	100%
5	Sin Tratar	Sin airear	75%
6	Sin Tratar	Aireación	75%
7	Sin Tratar	Aireación	100%
8	Sin Tratar	Sin airear	100%
9	Ozono	Sin airear	75%
10	Ozono	Aireación	75%
11	Ozono	Aireación	100%
12	Ozono	Sin airear	100%

Las plántulas de lechuga se colocaron en un total de 36 macetas plásticas de cinco litros de volumen.

Producción de las plántulas.

Se produjeron plántulas de lechuga Great Lakes 118 del tipo romanita en charolas germinadoras de 200 cavidades preparadas con peat moss y perlita, las que

estuvieron listas para su trasplante a los 40 días de ser puestas a germinar. Se trasplantaron el día 23 de marzo del 2014.

Métodos de desinfección del agua empleados.

Se utilizó agua de la Planta Tratadora de Aguas Residuales operada por la SEMARNAT, esta se ubica en la Escuela Forestal de Saltillo “Ing. José A. de la Cruz C”. Se desinfectó el agua residual con la inyección de ozono y rayos ultravioleta (UV), en el tratamiento con ozono se trató agua por 24 horas con una bomba generadora de ozono de la marca MORE-ZON10 y una bomba de aire BIOPRO BP9893 más un monitor REDOX/ORP.

En el tratamiento al agua residual con rayos UV se utilizó una lámpara STERLIGHT COPPER Modelo SC1 de vapor de mercurio de presión media. Se recirculó agua a través de la lámpara por un tiempo de 30 minutos. Un tercer tratamiento fue nuestro testigo, el que no llevó ningún proceso (ST).

Formulación de soluciones nutritivas.

En la formulación de las soluciones nutritivas, se consideraron el contenido de elementos que posee el agua y los requerimientos nutricionales idóneos de la lechuga según Cadahia (1999) y obtener así los aportes nutricionales finales. Se utilizó líquido de lombricomposta comercializado por la Gerencia de Empresas Universitarias de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila.

Cuadro 1. Valores del análisis del agua utilizada en el experimento.

	meq ^l ⁻¹							
	NH ₄	K	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	H ₂ PO ₄	HCO ₃
Agua residual	-----	-----	4	2.75	0.31	4	0.04	2.40

Cuadro 2. Solución para lechuga empleada en el trabajo (Cadahia, 1998).

Cultivo	meq/l ⁻¹							mg/l ⁻¹					
	NH ₄	K	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	H ₂ PO ₄	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
	1.25	11	9	2	19	2.2	2	2.20	.50	.26	.32	.05	.05

Formulación de solución nutritiva al 100%

Cuadro 3. Aportes en la formulación de la solución nutritiva al 100%.

meq/l ⁻¹								
HCO ₃	NH ₄	K	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	H ₂ PO ₄	
1.9*	1.25	11	5	-0.75	18.69	-1.80	1.96	

* Neutralización de bicarbonatos con ácido

Se realizó un monitoreo constante en las soluciones nutritivas. Se hicieron ajustes a la solución de Steiner como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Diseño de la solución empleada.

meq/l ⁻¹								
HCO ₃	NH ₄	K	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	H ₂ PO ₄	
1.9	1.25	11	5	2	18.69	-1.80	1.96	

Se realizaron análisis semanales de CE, pH, altura de la planta y número de hojas a cada una de las 36 plantas establecidas.

Cuadro 5. Fertilizante necesario para elaborar 270 litros de solución nutritiva.

Fuentes	Fertilizante	g ^L ⁻¹	g
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	0.14	38.81
Nitrato de Potasio	KNO ₃	1.01	272.97
Nitrato de Calcio	CaNO ₃ 4H ₂ O	0.59	159.30
Fosfato Monopotásico	KH ₂ PO ₄	0.10	27.56
Nitrato de Magnesio	Mg (NO ₃) ₂ 6H ₂ O	0.26	69.23
		mL⁻¹	ml
Ácido Nítrico	HNO ₃	0.16	42.75

Cuadro 6. Fuentes de microelementos y cantidades necesarias para 90 litros de solución nutritiva.

MICROELEMENTOS (mgL ⁻¹)			
Fuentes	Requerimientos	mgL ⁻¹	mg
EDDHA-Fe	2.20	12.22	1100
MnSO ₄	0.50	3.57	321.43
EDTA-Zn	0.26	1.76	158.11
H ₃ BO ₃	0.36	2.06	185.40
CUSO ₄ 5H ₂ O	0.05	0.20	17.67
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ 4H ₂ O	0.05	0.09	8.28

Preparación de solución nutritiva al 75% + 25% de líquido de lombricomposta.

Cálculo de la solución a complementar con el 25% de líquido de lombriz.

N= 1.25%

P= 0.25%

K= 1.99%

1% ————— 10,000 ppm

1.99% ————— X = 19,990 ppm de K

MeqL⁻¹ = 19,900 ppm

$\frac{\quad}{39 \text{ Pe}} = 510.25 \text{ MeqL}^{-1}$

Conversión de ppm a meqL⁻¹

$$\text{MeqL}^{-1} = \frac{\text{ppm}}{\text{Pe}}$$

➤ **valor a agregar de potasio = 11 MeL⁻¹.**

510.25 MeqL⁻¹ ————— 1 L

11 MeqL⁻¹ ————— X = 0.0215 L

11 MeqL⁻¹ ————— 0.0215 L ————— 100%

2.75 MeqL⁻¹ ————— X L ————— 75% = 0.0053 L

(2.75 MeqL⁻¹) (270 L) = 742.5 MeqL⁻¹ para 270 L de solución a preparar.

510.25 L ————— 1 litro

742.5 MeqL⁻¹ ————— X = 1.455 Litros

1.455 litros de líquido de lombricomposta para preparar 270 litros de solución hidropónica.

Cuadro 7. Fertilizante necesario para elaborar 270 litros de solución al 75% de concentración y complementada con 25% de líquido de lombricomposta.

Nombres	Fuentes	grL ⁻¹	g
Fosfato Mono amónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	0.11	29.11
Nitrato de Potasio	KNO ₃	0.76	204.72
Nitrato de Calcio	CaNO ₃ 4H ₂ O	0.44	119.47
Fosfato Mono potásico	KH ₂ PO ₄	0.08	20.67
Nitrato de Magnesio	Mg (NO ₃) ₂ 6H ₂ O	0.19	51.92
			ml
Ácido Nítrico	HNO ₃		32.06

Cuadro 8. Fuentes de microelementos y cantidades necesarias para 90 litros de solución al 75% de concentración y complementada con 25% de líquido de lombriz.

Micro-elementos		
Fuentes	mgL ⁻¹	mg
EDDHA-Fe	9.17	825.00
MnSO ₄	2.68	241.06
EDTA-Zn	1.32	118.58
H ₃ BO ₃	1.55	139.05
CUSO ₄ -5H ₂ O	0.15	13.25
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ 4H ₂ O	0.07	6.21

Diagnóstico nutricional. Desviación del óptimo porcentual (DOP).

El análisis foliar en el caso de los árboles frutales y el análisis de planta, en general, constituyen los instrumentos más utilizados por técnicos e investigadores para conocer la situación nutritiva de un determinado cultivo en un determinado momento de su ciclo vegetativo.

Desviación del óptimo porcentual (DOP), constituye un adecuado parámetro para evaluar simultáneamente, intensidad y calidad de la nutrición. Este índice de

interpretación del análisis vegetal permite además del diagnóstico realista de una situación nutricional dada, conocer el orden de limitación, tanto por exceso como por déficit, de cada uno de los nutrientes considerados.

El índice DOP es definido como la desviación porcentual de la concentración de un elemento (% sobre materia seca) con respecto a la concentración óptima considerada valor de referencia. El signo del DOP para un determinado elemento será negativo en caso de déficit y positivo en caso de exceso. Cuando el contenido de la muestra coincida con el óptimo de referencia el DOP será igual a cero.

$$DOP = \frac{C \times 100}{C_{ref}} - 100$$

Donde,

C: Es concentración foliar (en porcentaje sobre materia seca) del elemento en la muestra analizada.

C_{ref}: Es el óptimo del mismo elemento (porcentaje sobre materia seca) definido en las mismas condiciones en que fue tomada la muestra problema y, lógicamente, para el mismo cultivo.

Se ejemplifica con el Ca del tratamiento 1.

$$DOP \text{ Ca} = (1.12 \times 100/1.7) - 100 = -34$$

En el tratamiento 1 (UV + solución al 75 % + sin aireación) se tiene un valor de -34 por ciento, esto es la desviación del óptimo porcentual.

Aquel valor de DOP más cercano a cero, es el que presenta un mejor balance nutricional (Montañés *et al.*, (1991).

Establecimiento del experimento.

Una vez que la plántula alcanzó el tamaño ideal se trasplantó a macetas plásticas de 5 litros de volumen. Esto fue el día 23 de marzo. Al momento de realizar esta operación se dio un lavado a la raíz con la finalidad de quitar el sustrato proveniente de la charola germinadora.



Figura 3. Plántula de lechuga a trasplantar.

Entre la raíz y el tallo se le colocó una pequeña base de hule espuma (poliuretano) lo que funcionó como soporte para la plántula, para ello a las 36 macetas se les hizo un orificio en la parte central de la tapa con radio de 3 cm.

La aireación realizada a cada tratamiento durante todo el experimento, se hizo con una bomba comercial ELITE modelo 802, de las utilizadas en peceras.

En el Cuadro 9 se aprecia el diseño de tratamientos evaluados.

Cuadro 9. Diseño y distribución de tratamientos en la investigación.

Tratamientos	Agua Residual	Aireacion	Soluciones nutritivas
1	UV	Sin airear	75%
2	UV	Aireación	75%
3	UV	Aireación	100%
4	UV	Sin airear	100%
5	Sin Tratar	Sin airear	75%
6	Sin Tratar	Aireación	75%
7	Sin Tratar	Aireación	100%
8	Sin Tratar	Sin airear	100%
9	Ozono	Sin airear	75%
10	Ozono	Aireación	75%
11	Ozono	Aireación	100%
12	Ozono	Sin airear	100%

En los primeros días de trasplante, las plántulas sufrieron un estrés por las altas temperaturas que se generaron dentro del micro-túnel. No se reportaron pérdidas de plantas. El déficit de presión de vapor registrado a las 15:00 horas de cada día osciló en torno a 3 kPa (kilopascales), valor considerado negativo para el buen desarrollo del cultivo. (Urrestarázu, 2004)

Desde su establecimiento, cada semana se midieron el pH y la CE de la solución y se observaron respuestas en el desarrollo de las lechugas, como el tamaño de la planta, el número de hojas completamente desarrolladas, diámetro del tallo y consumo de solución nutritiva. Al final del trabajo se contó además con longitud de raíz, altura final de planta, peso fresco de raíz, peso fresco de follaje, peso seco de raíz y peso seco de follaje. Para obtener pesos secos se utilizó una estufa marca MAPSA modelo HDP/334 a 60°C por 48 horas. Para la determinación de los pesos de cada una de los variables se utilizó una balanza marca SARTORIUS modelo 1216 MP con capacidad de 1200 g.

Análisis estadístico.

Se realizó el análisis de la varianza de los efectos principales como un factorial en bloques al azar con tres repeticiones y se obtuvieron comparaciones gráficas que ilustran las respuestas de las variables agronómicas a los tratamientos probados. Para ello se empleó el programa estadístico SPSS “Statistical Product and Service Solutions” versión 22.0.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Análisis de varianza.

En el cuadro 10 se observan los cuadrados medios para tratamientos y la significancia de cada una de las variables evaluadas en el experimento. Se observan diferencias altamente significativas para pesos fresco y seco del follaje, significancia en diámetro del tallo, longitud de raíz fresca, longitud de follaje fresco y peso fresco de raíz, mientras que en consumo de agua no se presentan significancias.

Cuadro 10. Cuadrados medios para tratamiento al agua, concentración de solución y aireación, repeticiones, error experimental y coeficiente de variación para las variables evaluadas en el experimento de lechuga en raíz flotante. (Noviembre 2014).

FV	GL	CA	DT	LRF	LFF	PFR	PFF	PSR	PSF
TA	2	308386.1 NS	65.90 *	1.89 NS	7.58 NS	1.35 NS	83.82 NS	0.077 NS	0.025 NS
CS	1	326802.7 NS	.422 NS	.44 NS	132.25 *	11.67 *	763.60 NS	0.203 NS	5.60 NS
A	1	143136.1 NS	7.93 NS	93.44 *	56.25 NS	4.91 NS	2437.06 **	0.267 NS	17.92 **
R	2	94136.11 NS	4.53 NS	11.89 NS	36.33 NS	6.63 NS	554.15 NS	0.203 NS	5.00 *
EE	29	141884.3	9.87	17.84	27.42	2.37	297.13	0.069	1.50
CV (%)		43	45	41	30.4	70.23	83.99	66.66	72.86

FV=Fuente de Variación; GL=Grados de Libertad; CA=Consumo de Agua; DT=Diámetro del Tallo; LRF=Longitud de Raíz Fresca; LFF=Longitud de Follaje Fresco; PFR=Peso Fresco de Raíz; PFF= Peso Fresco Follaje; PSR=Peso Seco de Raíz; PSF=Peso Seco del Follaje; TA=Tratamiento del Agua; CS=Concentración de Solución; A=Aireación; R=Repetición; EE=Error Experimental; *=Significativo. **=Altamente Significativo; NS=No Significativo.

Consumo de agua

Para esta variable en el análisis estadístico no se detectaron diferencias entre los tratamientos probados (Cuadro 10).

Diámetro del tallo.

Para esta variable se encontró diferencia significativa entre tratamientos (Cuadro 10). Radiación UV como tratamiento al agua residual y asociado con la solución completa (100%) e inyectando aire, generó los mayores valores de diámetro de tallo así como las plantas con más vigor. Lo anterior coincide con trabajos desarrollados por González (2012), quien reporta que soluciones hidropónicas tratadas con UV generaron plantas de lechuga de alta sanidad y vigor. Lo anterior debido a la eliminación de patógenos del agua residual sin alterar la forma química de los elementos nutritivos.

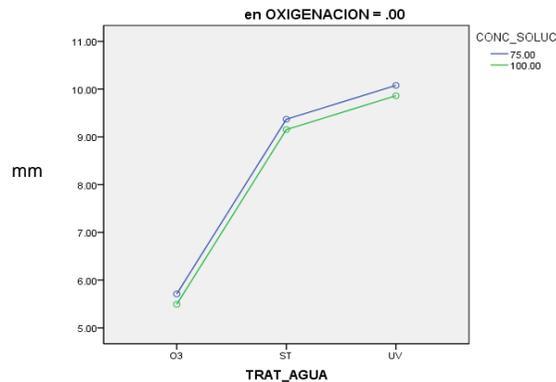
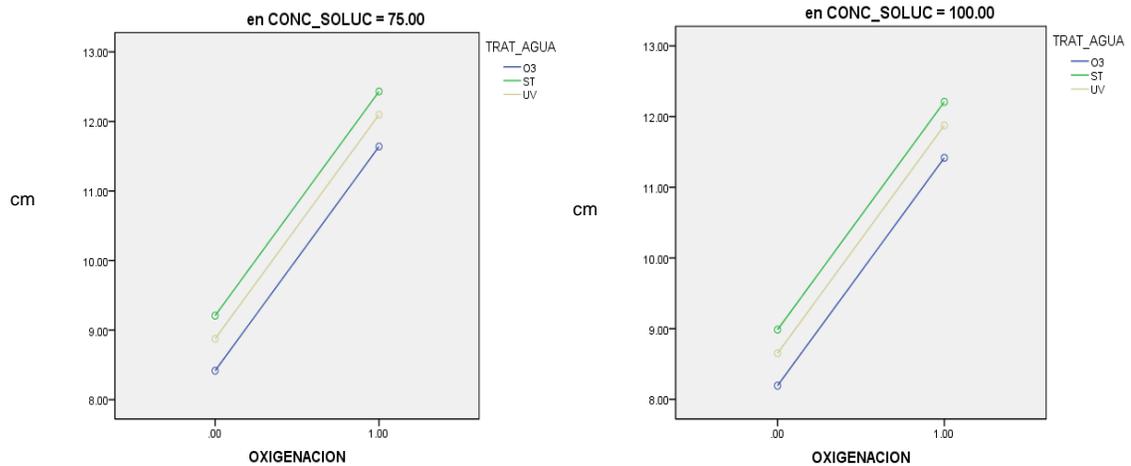


Figura 4. Efecto de los tratamientos en el diámetro del tallo

Longitud de raíz fresca.

La variable longitud de raíz mostró ser sensible a la aireación, el agua sin tratar, que tiene un 100 por ciento de concentración en sales minerales y con aireación, generó la mayor longitud de raíz. En este sentido, González (2013) explica que la aireación en su experimento con tomate favoreció el ingreso de cationes a los

tejidos conductores al medir la capacidad de intercambio catiónico a nivel raíz, lo que propicia un mayor crecimiento y desarrollo de las partes de la planta.



Figuras 5 y 6. Efecto de los tratamientos en la longitud de raíz fresca

Longitud de follaje fresco

La concentración de las soluciones reporta efecto significativo sobre la variable longitud de follaje fresco. En la Figura 7 se observa que la concentración al 100 por ciento en sales minerales, aireando la solución y sin tratar el agua de riego brindaron las mayores alturas de planta. Lo anterior coincide con el trabajo de González (2013) quien encontró que la aireación en tomate favorece la eficiencia en la absorción de nutrientes lo que repercute en un mayor tamaño de plantas. Así mismo, González (2012), afirma que no es necesario tratar el agua residual para obtener éxito en la producción de lechugas en raíz flotante ya que los microorganismos patógenos no ingresan a los tejidos conductores del cultivo.

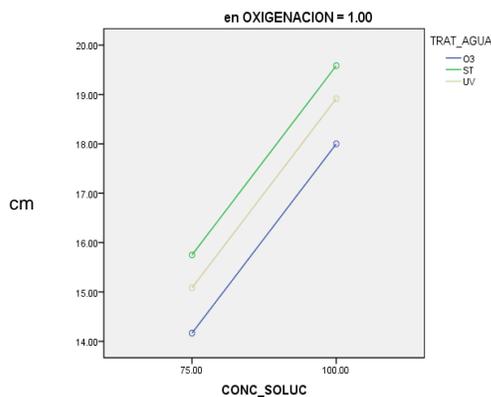
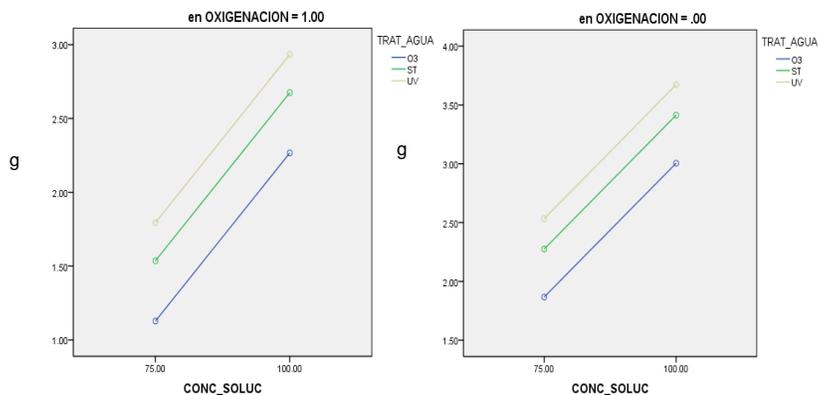


Figura 7. Efecto de los tratamientos en la longitud de follaje fresco

Peso fresco de raíz.

En el Cuadro 10 se observa que la concentración de solución genera plantas de diferente peso fresco en sus raíces. El tratamiento con UV y 100 por ciento en sales minerales y sin airear arrojó los mayores pesos. El color blanco de raíces fue un indicador de su alta sanidad.

En las Figuras 8 y 9 se observa que en los tratamientos que incluyen al ozono en la desinfección del agua, se tuvieron las plantas de menor peso en sus raíces. El ozono propicia un cambio negativo en las formas químicas de nutrientes al oxidarlos. Las plantas de lechuga tendrán menos elementos disponibles.

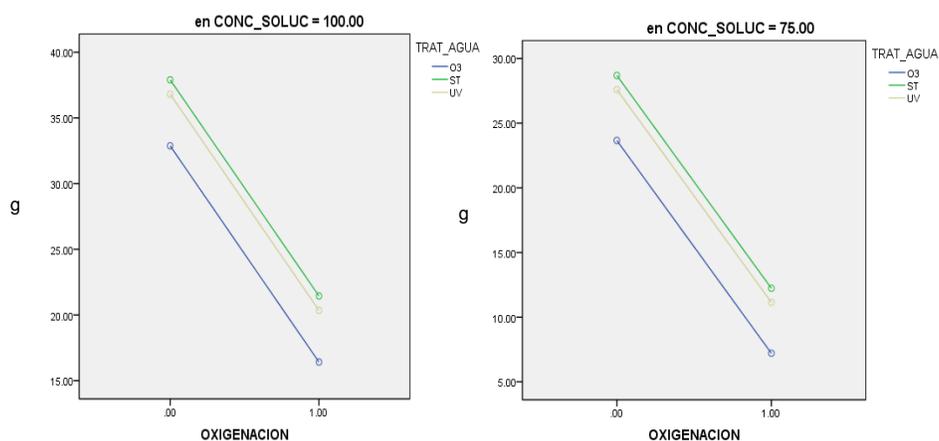


Figuras 8 y 9 Efecto de los tratamientos en el peso fresco de raíz.

Peso fresco de follaje.

El análisis de varianza del Cuadro 10 presenta diferencias altamente significativas. La ausencia o el aporte de aire en la solución nutritiva, tiene un efecto muy marcado sobre esta variable. El tratamiento que mayor peso reportó fue cuando no se trató el agua residual con la concentración al 100 por ciento y sin airear el medio de crecimiento de lechugas. Al igual que el peso fresco de raíz, el de follaje también se vio afectado por la inclusión de ozono, ya que al relacionarlo con soluciones sin airear al 75 por ciento de concentración más 25 por ciento de líquido de lombricomposta arrojó los menores pesos. Lo anterior se aprecia en las Figuras 10 y 11.

Raub *et al.*, (2001) citados por Rojas, mencionan que el ozono favorece la nitrificación y la asimilación de los nutrientes al oxigenar la solución pudiendo aumentar el vigor. Nuestros resultados no concuerdan con lo expuesto por Raub ya que los menores rendimientos los obtuvimos cuando el ozono estuvo presente en los tratamientos. Sin embargo González (2012), encontró rendimientos muy favorables en soluciones tratadas con rayos UV y complementadas con líquido de lombricomposta. Lo que se asemeja en cierta medida a lo encontrado en nuestro trabajo.



Figuras 10 y 11 Efecto de los tratamientos en el peso fresco de follaje

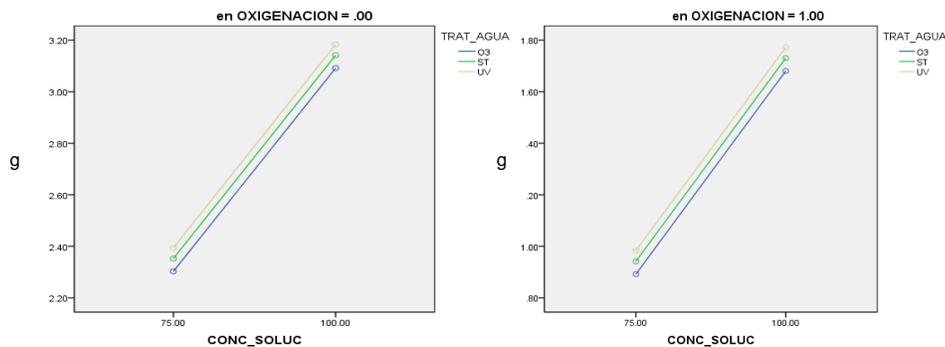
Peso seco de raíz.

El Cuadro 10 refleja la ausencia de significancia para peso seco de raíz.

Peso seco de follaje.

Para esta variable se encontró una diferencia altamente significativa (Cuadro 10). El tratamiento UV sin airear y con el 100 por ciento de concentración fue el que reportó los mayores pesos secos de follaje.

Como lechuga es una especie que tolera valores de 3.5 a 4 mgL⁻¹ en concentración de oxígeno (Urrestarázu, 2004), nuestras plantas no tuvieron problema para prosperar en esta condición. Así mismo UV favoreció a la solución nutritiva al no alterar las formas químicas de elementos nutrimentales. El no emplear líquido de lombricomposta libera de la incorporación de una carga biológica a la solución nutritiva, la que podría ser competitiva con las plantas de lechuga. (Figuras 12 y 13).



Figuras 12 y 13. Efecto de los tratamientos en peso seco de follaje

En el cuadro 11 se presentan los cuadrados medios para tratamientos y la significancia para los valores de eficiencias en la absorción nutrimental. Se observan diferencias altamente significativas para eficiencia en magnesio y zinc. Diferencias significativas en eficiencia en calcio, potasio, fierro y cobre. La eficiencia en materia fresca no presenta diferencias significativas.

Cuadro 11. Cuadrados medios para tratamiento al agua, concentración de solución y aireación, repeticiones, error experimental y coeficiente de variación y coeficiente de variación para los valores de eficiencias en la absorción nutrimental.

FV	GL	EMF	E Ca	E Mg	E K	E Zn	E Mn	E Fe	E Cu
TA	2	8814.18 NS	206.66 NS	142.71 NS	3314.71 NS	.001 NS	.018 NS	.059 NS	5.17 NS
CS	1	16952.90 NS	1213.59 *	425.94 *	4038.17 NS	1.73 NS	.003 NS	.137 NS	3.64 NS
A	1	1535.31 NS	1685.37 *	708.18 **	27159.04 *	.019 NS	.071 NS	.235 *	.001 *
R	2	1922.48 NS	841.15 NS	258.72 NS	14897.26 *	.027 **	.050 NS	.220 *	.00 *
EE	9	4364.76	256.76	91.60	4318.15	.005	.019	.046	.000
CV (%)		97.58	68.64	74.88	82.22	75.39	93.92	71.24	87.31

FV=Fuente de Variación; GL=Grados de Libertad; EMF=Eficiencia en Materia Fresca; ECa=Eficiencia en Calcio; EMg=Eficiencia en Magnesio; EK=Eficiencia en Potasio; EZn=Eficiencia en Zinc; EMn. Eficiencia en Manganeso; EFe= Eficiencia en Hierro; ECu= Eficiencia en cobre; TA=Tratamiento del Agua; CS=Concentración de Solución; A=Aireación; R=Repetición; EE=Error Experimental. *Significativo **Altamente Significativo. N.S. No Significativo.

La explicación de resultados y discusión de la situación nutrimental del trabajo de investigación se hará mediante la técnica diagnóstico de la desviación del óptimo porcentual que se presenta a continuación

Resultados del método de desviación del óptimo porcentual (DOP).

Cuadro 12. Tabla de resultados de análisis de DOP para cada uno de los tratamientos establecidos.

Tratamiento 1								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.12	0.70	0.19	4.57	47	90	163.33	7
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-33.92	39.33	-52.5	-29.69	-46.67	-21.74	2.08	-84.44
Cu > P > Zn > Ca > K > Mn > Fe > Mg							Σ = 310.37	
Tratamiento 2								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.22	0.74	0.17	4.90	56.67	103.33	306.67	7.67
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-28.04	47.33	-57.5	-24.62	-35.24	-10.14	91.67	-82.96
Cu > P > Zn > Ca > K > Mn > Mg > Fe							Σ = 377,5	
Tratamiento 3								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.70	0.91	0.1	4.59	43.33	56.67	220	5
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	0.0	82	-75	-29.38	-50.48	-50.72	37.50	-88.89
Cu > P > Mn > Zn > K > Ca > Fe > Mg							Σ = 413.97	
Tratamiento 4								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.20	0.61	0.18	4.33	40	56.67	166.66	6
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-29.41	21.33	-55	-33.33	-54.29	-50.72	4.17	-86.67
Cu > P > Zn > Mn > K > Ca > Fe > Mg							Σ = 334.92	
Tratamiento 5								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.60	0.85	0.11	5.51	50	100	160	7.33
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	6.07	70	-72.5	-15.28	-42.86	-13.04	0.0	-83.70
Cu > P > Zn > K > Mn > Ca > Fe > Mg							Σ = 303.45	
Tratamiento 6								

Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.85	0.89	0.21	4.98	60	86.67	150	7.66
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	9.01	77.33	-47.5	-23.44	-31.43	-24.63	-6.25	-82.96
Cu> P> Zn> Mn> K> Fe> Ca> Mg							Σ =302.55	
Tratamiento 7								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.64	0.88	0.11	5.29	53.33	103.33	200	9
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-3.52	75.33	-72.5	-18.67	-39.05	-10.14	25	-80
Cu> P> Zn> K> Mn> Ca> Fe> Mg							Σ =324.21	
Tratamiento 8								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.53	1.13	0.17	3.65	33.33	70	173.33	6
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-9.80	125.33	-57.5	-43.79	-61.90	-39.13	8.33	-86.66
Cu> Zn> P> K> Mn> Ca> Fe> Mg							Σ =432.44	
Tratamiento 9								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.21	0.58	0.23	4.35	90	126.67	160	6.66
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-28.82	16	-42.5	-33.08	2.86	10.14	0.0	-85.18
Cu> P> K> Ca> Fe> Zn> Mn> Mg							Σ =218.58	
Tratamiento 10								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.55	0.94	0.15	5.08	110	86.67	183.33	8.33
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-8.82	88	-62.5	-21.90	25.71	-24.63	14.58	-81.48
Cu> P> Mn> K> Ca> Fe> Zn> Mg							Σ =327.62	
Tratamiento 11								
Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.45	0.61	0.13	4.26	70	86.67	173.33	6.66
Nivel óptimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-14.70	22.66	-67.5	-34.51	-20.00	-24.63	8.33	-85.18
Cu> P> K> Mn> Zn> Ca> Fe> Mg							Σ =277.51	
Tratamiento 12								

Elemento	Ca (%)	Mg (%)	P (%)	K (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Concentración	1.10	0.56	0.12	3.23	30	46.67	146.66	4.66
Nivel optimo	1.7	0.5	0.4	6.5	87.5	115	160	45
DOP	-35.29	11.33	-70	-50.36	-65.71	-59.42	-8.33	-89.62
	Cu> P> Zn> Mn> K> Ca> Fe> Mg						Σ =390.06	

En el Cuadro 12 se muestran la concentración del elemento en las muestras de lechuga del experimento, el nivel óptimo de referencia de cada elemento mineral y el orden de requerimiento nutrimental de cada tratamiento evaluado. Los elementos más deficientes son el cobre, el fósforo y el zinc. Los elementos que se encontraron en niveles adecuados fueron el calcio, hierro y magnesio.

El tratamiento número 8 que consideró agua residual sin tratar y sin airear al 100 por ciento de concentración presenta el orden de requerimiento nutricional siguiente: Cu>Zn>P>K>Mn>Ca>Fe>Mg; esto quiere decir que el cobre es el elemento más deficiente, le sigue el zinc y así sucesivamente. El hierro y el magnesio fueron los elementos que estuvieron en un nivel adecuado en el tejido vegetal de lechuga. El mayor valor de índice de desbalance nutricional lo generó este tratamiento ocho, su valor de 432.44 refleja que es el menos equilibrado desde el punto de vista nutricional. Sin embargo, esta situación no impidió que las lechugas crecidas en éste, produjeran los mayores valores de peso fresco.

El tratamiento con menor índice de desbalance nutricional es el número nueve que considera la desinfección al agua residual con ozono sin airear al 75 por ciento, su valor es de 218.58. Cobre y fósforo fueron los elementos más deficientes, mientras que manganeso y magnesio tuvieron niveles adecuados en el tejido vegetal. Su orden de requerimiento nutricional fue: Cu> P> K> Ca> Fe> Zn> Mn> Mg. Al igual que el peso fresco de raíz, el de follaje también se vio afectado por la inclusión de ozono, ya que al relacionarlo con soluciones sin airear al 75 por ciento de concentración más 25 por ciento de líquido de lombricomposta arrojó los menores pesos. Lo anterior se aprecia en la Figura 12 y 13.

Raub *et al.*, (2001) citado por Rojas mencionan que el ozono favorece la nitrificación y la asimilación de los nutrientes al oxigenar la solución pudiendo aumentar el vigor. Nuestros resultados concuerdan parcialmente con lo expuesto por Raub ya que se logró un mejor balance nutrimental pero un menor rendimiento en peso fresco de lechugas. Respuestas diferentes se tienen al emplear Rayos UV y complementadas con líquido de lombricomposta, esto lo menciona González (2012), quien reporta rendimientos mayores en peso fresco de lechuga, lo que se asemeja en buena medida a lo encontrado en el presente trabajo.

pH y Conductividad eléctrica

De acuerdo con Lara (2000), el pH apropiado para el sistema hidropónico de lechuga en raíz flotante se ubica en torno a 5.5 y 6.0. En esta investigación los valores de pH se mantuvieron en un rango de 6.5 a 6.8 sin ajustarlo. La dinámica de intercambio de elementos entre la raíz y el medio fue la única responsable de esa fluctuación.

Con respecto a la conductividad eléctrica, menciona Urrestarazu (2004) que un valor apropiado para el cultivo de lechuga es del orden de 2.5 dSm^{-1} . En el presente trabajo se reportaron cifras entre 2.4 y 3.0, valores que permitieron un buen desarrollo de las plantas.

V. CONCLUSIONES

- ✚ El agua sin tratar al 100 por ciento de concentración en sales minerales y sin aireación generó los mayores valores en las variables evaluadas. Sin embargo es el que presenta el peor índice de balance nutricional.
- ✚ El orden de requerimiento siguiente: $Cu > P > Zn > K > Mn > Ca > Fe > Mg$ fue el que predominó en el diagnóstico nutricional realizado a los tratamientos.
- ✚ El Agua tratada con ozono sin airear más 75 por ciento de concentración en sales minerales y complementadas con 25 por ciento de líquido de lombricomposta, produjo plantas de lechuga con el mejor balance nutricional.

VI. LITERATURA CITADA

- Barreto, B.R. 2014. Diagnostico nutricional de cuatro cultivares de lechuga establecidas en el sistema NGS (New Growing Sistem). Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.
- Bobadilla, S.E.E., Rivera, H.G., Del Moral, B.L.E. 2010. Factores de competitividad del cultivo de lechuga en Santa María Jajalpa, Estado de México, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. México.
- Cadahia, L. C. 2005. Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, España. Pág. 77, 314.
- Díaz, F.R., 2004. Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero. Instituto de Ciencias Agrícolas. Universidad de Guanajuato.
- Fernández, Z. M. 2003. Evaluación agronómica de sustratos húmicos derivados de humus de lombriz. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería. Chile.
- González, A.R.M. 2012. Aprovechamiento de agua residual urbana en la producción hidropónica de plantas de lechuga (*lactuca sativa L.*). Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.
- González, R.D. 2013. Efecto de coadyuvantes de la nutrición del tomate (*lycopersicon esculentum mill.*) establecido en un sistema hidropónico de raíz flotante. Tesis de Licenciatura. UAAAN. México.
- López, V.A. 1990. Producción de hortalizas, Editorial Limusa, México. Pág. 151-152.
- Malca, O.G. 2001. Seminario de agro negocios, lechugas hidropónicas de la Universidad del Pacifico. Facultad de Administración y Contabilidad. Perú.

- Manahan, S.E. 2007. Introducción a la química ambiental. Editorial Revérte, UNAM, México. Pág. 145-148- 243.
- Montañés, L., Heras, L. y Sanz, M. 1991. Desviación del óptimo porcentual (DOP): Nuevo índice para interpretación del análisis vegetal, estación experimental de Zaragoza, España.
- Remy, M. 2005. Evaluación de dos técnicas hidropónicas adaptadas para las condiciones del trópico húmedo. Proyecto de Graduación Lic. Ing. Agr. Guácimo, Universidad EARTH, Pág. 49. Costa Rica.
- Resh, H.M. 2001. Cultivos hidropónicos, 5a edición. Ediciones Mundi-prensa, Madrid, España. pág. 134-136-137.
- Reuter, D.J., Robinson, J.B. 1986. Plant analysis. An interpretation manual. Inkata Press. Melbourne, Australia.
- Rojas, M.N. 2006. Aprovechamiento de residuos selectivos y aguas residuales tratadas para cultivos urbanos. Instituto de ingeniería de la UNAM, México.
- Samperio, G. 2005. Hidroponía básica. Editorial Diana, México. Pág. 13-14. 28-29.
- Sánchez-Del C.F., Moreno, P.E.C., Pineda, P. J., Rodríguez, P.J.M., Osuna, E.T. 2004. Producción hidropónica de jitomate (*solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Schubert, M. 1981. Manual práctico de hidrocultivo. Edición Omega, S.A. Casanova, 220. Barcelona, España. Pág.16.
- Urrestarazu, G.M. 2004. Manual de cultivos sin suelo. Universidad de Almería. Mundi-Prensa. España.
- Valadez, S.F. 2011. Aprovechamiento de agua de lluvia en la producción hidropónica de lechuga (*lactuca sativa* L.). Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.

VII. CONSULTAS REALIZADAS EN INTERNET

- Barreiro, D.N. 2012. Evaluación económica de un proyecto de lombricultura. Fecha de consulta: 23/11/2014 en <http://espartaco.azc.uam.mx/tesis/X19160>.
- Correa, D.P. 2006. Aplicación de ozono en disoluciones nutritivas recirculantes, Madrid, España. Fecha de consulta: 28/10/2014 en http://www.cosemarozono.es/pdf/proyecto_4.pdf.
- Díaz, S.F.R. 2004. Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero. Instituto de Ciencias Agrícolas. Universidad de Guanajuato. México. Fecha de consulta 20/10/2014 disponible en <http://www.uaaan.mx/postgrado/images/files/hort/simposio4/04-Seleccion-sustratos-prodhortinvernadero.pdf>
- Empresa proyectos hidropónicos integrales chile. Proyecto de educación ambiental integral, Colegio Cristiano los Héroes Santiago de Chile. Fecha de consulta: 25/10/2014 en <http://huertohidroponicocch.jimdo.com/m%C3%A9todo-ra%C3%ADz-flotante/>
- Environmental Protection, 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, desinfección con luz ultravioleta, USA. Fecha de consulta: 26/10/2014 en http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-064.pdf.
- Environmental Protection. 1999. Desinfección con luz ultra violeta. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. EPA. Fecha de consulta: 26/10/2014 en http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-064.pdf

- FAO, 2001. Agua y cultivos logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Fecha de consulta 23/10/2014 disponible en http://www.fao.org/docrep/005/Y3918S/y3918s03.htm#P0_0
- FAO, 2005. FAO en el terreno 2005, Fecha de consulta 31/10/14 disponible en <http://www.fao.org/Newsroom/es/field/2005/index.html>
- FAO, 2012. Utilización y reutilización del agua para la agricultura urbana. Fecha de consulta 23/10/2014 disponible en <http://www.fao.org/fcit/upa/water-urban-agriculture/es/>
- FAO, Agricultura Mundial: hacia (2015-2030). Fecha de consulta: 20/11/2014 disponible en <http://www.fao.org/spanish/newsroom/news/2003/14640-es.html>
- Friedrich, E. 2010. El valle del mezquital y sus aguas negras. Fecha de consulta: 14/10/14 disponible en <http://www.reiterhofmezquital.org/Articulos%20sobre%20Valle%20de%20Mezquital/articulopag32apag33Feb2008.pdf>
- Howard, 1947. Un testamento agrícola, Fecha de consulta 24/11/14 disponible en <http://sat3117.com/pub/libros/UnTestamentoAgricola.pdf>
- Lara, H.A. 2000. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. Fecha de consulta 31/10/2014 disponible en <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/17/3/art221-229.pdf>
- Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica) No. 2004 Fecha de consulta: 18/10/2014 disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A1897E/A1897E.PDF> 28/102014

Martínez, G.G.A., Ortiz, H. Y., López, P.R. 2012. Oxigenación de la solución nutritiva recirculante y su efecto en tomate y lechuga. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Rural Integral Unidad Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional. México. Fecha de consulta 1/11/2014 disponible en http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/353_Especial_5/8a.pdf

Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. México. Fecha de consulta 2/11/2014 Disponible en: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2014/feb-mar/art-5.pdf>.