

PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN ZONAS URBANAS

Guillermo Jesuita Pérez Marroquín
José Eduardo Desiderio Lorenzo
Fabian Enríquez García
Fabián Vázquez Cruz
Raúl Berdeja Arbeu
Ramiro Escobar Hernández
Sigfrido David Morales Fernández



EDITORA
ARTEMIS
2025

PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN ZONAS URBANAS

Guillermo Jesuita Pérez Marroquín
José Eduardo Desiderio Lorenzo
Fabian Enríquez García
Fabián Vázquez Cruz
Raúl Berdeja Arbeu
Ramiro Escobar Hernández
Sigfrido David Morales Fernández



EDITORA
ARTEMIS
2025



O conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons Atribuição-Não-Comercial NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Direitos para esta edição cedidos à Editora Artemis pelos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento, desde que sejam atribuídos créditos aos autores, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

A responsabilidade pelo conteúdo dos artigos e seus dados, em sua forma, correção e confiabilidade é exclusiva dos autores. A Editora Artemis, em seu compromisso de manter e aperfeiçoar a qualidade e confiabilidade dos trabalhos que publica, conduz a avaliação cega pelos pares de todos manuscritos publicados, com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

Editora Chefe	Prof. ^a Dr. ^a Antonella Carvalho de Oliveira
Editora Executiva	M. ^a Viviane Carvalho Mocellin
Direção de Arte	M. ^a Bruna Bejarano
Diagramação	Elisangela Abreu
Autores	Guillermo Jesuita Pérez Marroquín José Eduardo Desiderio Lorenzo Fabian Enríquez García Fabiél Vázquez Cruz Raúl Berdeja Arbeu Ramiro Escobar Hernández Sigfrido David Morales Fernández
Imagem da Capa	naturetron/123RF
Bibliotecário	Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Conselho Editorial

Prof.^a Dr.^a Ada Esther Portero Ricol, *Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”*, Cuba
Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Prof. Dr. Agustín Olmos Cruz, *Universidad Autónoma del Estado de México*, México
Prof.^a Dr.^a Amanda Ramalho de Freitas Brito, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Prof.^a Dr.^a Ana Clara Monteverde, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof.^a Dr.^a Ana Júlia Viamonte, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
Prof. Dr. Ángel Mujica Sánchez, *Universidad Nacional del Altiplano*, Peru
Prof.^a Dr.^a Angela Ester Mallmann Centenaro, Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
Prof.^a Dr.^a Begoña Blandón González, *Universidad de Sevilla*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Carmen Pimentel, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.^a Dr.^a Catarina Castro, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.^a Dr.^a Cirila Cervera Delgado, *Universidad de Guanajuato*, México
Prof.^a Dr.^a Cláudia Neves, Universidade Aberta de Portugal
Prof.^a Dr.^a Cláudia Padovesi Fonseca, Universidade de Brasília-DF, Brasil
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
Dr. Cristo Ernesto Yáñez León – New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, Estados Unidos
Prof. Dr. David García-Martul, *Universidad Rey Juan Carlos de Madrid*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Deuzimar Costa Serra, Universidade Estadual do Maranhão, Brasil
Prof.^a Dr.^a Dina Maria Martins Ferreira, Universidade Estadual do Ceará, Brasil
Prof.^a Dr.^a Edith Luévano-Hipólito, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, México
Prof.^a Dr.^a Eduarda Maria Rocha Teles de Castro Coelho, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers, Universidade de São Paulo (USP), Brasil
Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima, Brasil
Prof.ª Dr.ª Elvira Laura Hernández Carballido, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, México
Prof.ª Dr.ª Emilas Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste/ Universidad Tecnológica Nacional*, Argentina
Prof.ª Dr.ª Erla Mariela Morales Morgado, *Universidad de Salamanca*, Espanha
Prof. Dr. Ernesto Cristina, *Universidad de la República*, Uruguay
Prof. Dr. Ernesto Ramírez-Briones, *Universidad de Guadalajara*, México
Prof. Dr. Fernando Hitt, *Université du Québec à Montréal*, Canadá
Prof. Dr. Gabriel Díaz Cobos, *Universitat de Barcelona*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Gabriela Gonçalves, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
Prof.ª Dr.ª Galina Gumovskaya – Higher School of Economics, Moscow, Russia
Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
Prof.ª Dr.ª Gladys Esther Leoz, *Universidad Nacional de San Luis*, Argentina
Prof.ª Dr.ª Glória Beatriz Álvarez, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof. Dr. Gonçalo Poeta Fernandes, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal
Prof. Dr. Gustavo Adolfo Juarez, *Universidad Nacional de Catamarca*, Argentina
Prof. Dr. Guillermo Julián González-Pérez, *Universidad de Guadalajara*, México
Prof. Dr. Håkan Karlsson, *University of Gothenburg*, Suécia
Prof.ª Dr.ª Iara Lúcia Tescarollo Dias, Universidade São Francisco, Brasil
Prof.ª Dr.ª Isabel del Rosario Chiyon Carrasco, *Universidad de Piura*, Peru
Prof.ª Dr.ª Isabel Yohena, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof. Dr. Ivan Amaro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
Prof. Dr. Iván Ramon Sánchez Soto, *Universidad del Bío-Bío*, Chile
Prof.ª Dr.ª Ivânia Maria Carneiro Vieira, Universidade Federal do Amazonas, Brasil
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz, *University of Miami and Miami Dade College*, Estados Unidos
Prof. Dr. Jesús Montero Martínez, *Universidad de Castilla - La Mancha*, Espanha
Prof. Dr. João Manuel Pereira Ramalho Serrano, Universidade de Évora, Portugal
Prof. Dr. Joaquim Júlio Almeida Júnior, UnifIMES - Centro Universitário de Mineiros, Brasil
Prof. Dr. Jorge Ernesto Bartolucci, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México
Prof. Dr. José Cortez Godinez, Universidad Autónoma de Baja California, México
Prof. Dr. Juan Carlos Cancino Díaz, Instituto Politécnico Nacional, México
Prof. Dr. Juan Carlos Mosquera Feijoo, *Universidad Politécnica de Madrid*, Espanha
Prof. Dr. Juan Diego Parra Valencia, *Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín*, Colômbia
Prof. Dr. Juan Manuel Sánchez-Yáñez, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, México
Prof. Dr. Juan Porras Pulido, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil
Prof.ª Dr.ª Livia do Carmo, Universidade Federal de Goiás, Brasil
Prof.ª Dr.ª Luciane Spanhol Bordignon, Universidade de Passo Fundo, Brasil
Prof. Dr. Luis Fernando González Beltrán, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México
Prof. Dr. Luis Vicente Amador Muñoz, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Macarena Esteban Ibáñez, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha
Prof. Dr. Manuel Ramiro Rodríguez, *Universidad Santiago de Compostela*, Espanha
Prof. Dr. Manuel Simões, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
Prof.ª Dr.ª Márcia de Souza Luz Freitas, Universidade Federal de Itajubá, Brasil
Prof. Dr. Marcos Augusto de Lima Nobre, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil
Prof. Dr. Marcos Vinicius Meiado, Universidade Federal de Sergipe, Brasil
Prof.ª Dr.ª Mar Garrido Román, *Universidad de Granada*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Margarida Márcia Fernandes Lima, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil
Prof.ª Dr.ª María Alejandra Arecco, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina

Prof.ª Dr.ª Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia, Brasil
Prof.ª Dr.ª Maria Carmen Pastor, *Universitat Jaume I*, Espanha
Prof.ª Dr.ª Maria da Luz Vale Dias – Universidade de Coimbra, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão, Brasil
Prof.ª Dr.ª MªGraça Pereira, Universidade do Minho, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria Gracinda Carvalho Teixeira, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.ª Dr.ª María Guadalupe Vega-López, *Universidad de Guadalajara, México*
Prof.ª Dr.ª Maria Lúcia Pato, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maritza González Moreno, *Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba*
Prof.ª Dr.ª Maurícia Silva de Paula Vieira, Universidade Federal de Lavras, Brasil
Prof. Dr. Melchor Gómez Pérez, Universidad del País Vasco, Espanha
Prof.ª Dr.ª Ninfa María Rosas-García, Centro de Biotecnología Genómica-Instituto Politécnico Nacional, México
Prof.ª Dr.ª Odara Horta Boscolo, Universidade Federal Fluminense, Brasil
Prof. Dr. Osbaldo Turpo-Gebera, *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Peru*
Prof.ª Dr.ª Patrícia Vasconcelos Almeida, Universidade Federal de Lavras, Brasil
Prof.ª Dr.ª Paula Arcoverde Cavalcanti, Universidade do Estado da Bahia, Brasil
Prof. Dr. Rodrigo Marques de Almeida Guerra, Universidade Federal do Pará, Brasil
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares, Universidade Federal do Piauí, Brasil
Prof. Dr. Sergio Bitencourt Araújo Barros, Universidade Federal do Piauí, Brasil
Prof. Dr. Sérgio Luiz do Amaral Moretti, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Prof.ª Dr.ª Silvia Inés del Valle Navarro, *Universidad Nacional de Catamarca, Argentina*
Prof.ª Dr.ª Solange Kazumi Sakata, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)- USP, Brasil
Prof.ª Dr.ª Stanislava Kashtanova, *Saint Petersburg State University, Russia*
Prof.ª Dr.ª Susana Álvarez Otero – Universidad de Oviedo, Espanha
Prof.ª Dr.ª Teresa Cardoso, Universidade Aberta de Portugal
Prof.ª Dr.ª Teresa Monteiro Seixas, Universidade do Porto, Portugal
Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa, Brasil
Prof.ª Dr.ª Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
Prof.ª Dr.ª Vera Lúcia Vasilévski dos Santos Araújo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, *Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Colômbia*
Prof. Dr. Xosé Somoza Medina, *Universidad de León, Espanha*

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

P964 Producción de Lechuga en Zonas Urbanas [livro eletrônico] / Guillermo Jesuïta Pérez Marroquín... [et al.]. – Curitiba, PR: Artemis, 2025.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-81701-52-9

DOI 10.37572/EdArt_200625529

1. Agricultura urbana. 2. Alimentos – Produção. 3. Alface – Cultivo. I. Pérez Marroquín, Guillermo Jesuïta. II. Desiderio Lorenzo, José Eduardo. III. Enríquez García, Fabian. IV. Vázquez Cruz, Fabiel. V. Berdeja Arbeu, Raúl. VI. Escobar Hernández, Ramiro. VII. Morales Fernández, Sigfrido David.

CDD 635.52

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración en la realización del presente libro a los Cuerpos Académicos: BUAP CA-231-Manejo de Recursos Filogenéticos con la línea de investigación *Manejo y Conservación de Recursos Filogenéticos*; y BUAP-CA-355-Agrobiotecnología y Recursos Naturales, con línea de investigación *Biotecnología, Conservación y Protección Vegetal*. Dicho trabajo fue financiado en su impresión final por la Asociación Sindical de Personal Académico de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (ASPABUAP).

PRÓLOGO

Esta obra presenta un análisis sobre la agricultura urbana y la hidroponía, desarrollando un modelo de producción automatizado para el cultivo de lechugas en ciudades. El lector podrá comprender los principios fundamentales de los sistemas de producción sin suelo, los requerimientos nutricionales y edafoclimáticos del cultivo, así como las tecnologías de monitoreo y control aplicadas en el modelo propuesto. Finalizando con una prueba y resultados obtenidos de un trabajo de investigación.

El propósito de este trabajo es ofrecer a productores, investigadores y entusiastas del tema una guía clara para la implementación de sistemas eficientes de cultivo en entornos urbanos. La automatización y el uso inteligente de recursos no solo optimizan la producción, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y accesibilidad de alimentos frescos para la población en constante crecimiento.

Esperamos que esta obra sea una contribución valiosa para el desarrollo de nuevas soluciones agrícolas en ciudades y que sirva de inspiración para futuras investigaciones y proyectos en el campo de la agro-tecnología.

Guillermo Jesuita Pérez Marroquín

José Eduardo Desiderio Lorenzo

Fabian Enríquez García

Fabiel Vázquez Cruz

Raúl Berdeja Arbeu

Ramiro Escobar Hernández

Sigfrido David Morales Fernández

APRESENTAÇÃO

El principal uso del agua es el agrícola, actualmente el crecimiento demográfico está ejerciendo una presión sobre los recursos agua y suelo, además del crecimiento demográfico se estima que para año 2050 el 63% de las personas en el mundo viva en zonas urbanas, ante estas problemáticas se busca encontrar métodos de producción que sean eficientes en el uso de estos recursos naturales, la producción de cultivos sin suelo nos permite un mayor ahorro en los recursos hídricos. La obra muestra un modelo de producción de lechuga para ser utilizado principalmente en zonas urbanas, usando energía leds de espectro completo, donde se pueden medir variables como temperatura ambiental, humedad relativa, temperatura de la solución nutritiva, conductividad eléctrica y potencial de hidrogeno. También se pueden obtener datos de peso fresco de hojas y raíz, peso seco de hojas y raíz, altura de la planta, numero de hojas, longitud de raíz y contenido de macro y micro elementos.

SUMÁRIO

PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN ZONAS URBANAS

Guillermo Jesuita Pérez Marroquín

José Eduardo Desiderio Lorenzo

Fabian Enríquez García

Fabiel Vázquez Cruz

Raúl Berdeja Arbeu

Ramiro Escobar Hernández

Sigfrido David Morales Fernández

 https://doi.org/10.37572/EdArt_200625529

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
AGRICULTURA URBANA	
CAPÍTULO 2	4
INVESTIGACIONES DE PRODUCCIÓN EN PROTOTIPOS AUTOMATIZADOS DE ZONAS URBANAS	
CAPÍTULO 3	6
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SIN SUELO	
CAPÍTULO 4	8
GENERALIDADES DEL CULTIVO DE LECHUGA	
CAPÍTULO 5	10
REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS	
CAPÍTULO 6	11
SOLUCIÓN NUTRITIVA	
CAPÍTULO 7	14
SISTEMAS DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL	

CAPÍTULO 8	18
MODELO PARA PRODUCIR LECHUGA EN ZONAS URBANAS	
CAPÍTULO 9	23
PRODUCCION EN CULTIVO DE LECHUGA CON LOS TRES SISTEMAS	
CAPÍTULO 10	28
FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO	
CAPÍTULO 11	38
REFLEXION FINAL	
LITERATURA CITADA	39
ANEXOS	44
SOBRE OS AUTORES	50

INTRODUCCIÓN



Actualmente, el 55 % de la población en el mundo viven en ciudades. Según el nuevo informe de la Organización de las Naciones Unidas, se estima que esta proporción aumentará hasta un 13 % de cara al año 2050 (ONU, 2018), por lo que la agricultura necesitará incrementar su producción un 60 % a nivel global, y un 100 % más en países en desarrollo, lo anterior provocará que el grado de presión sobre los recursos agua y suelo aumenten exageradamente (FAO, 2013).

Además del crecimiento demográfico mundial, se tiene que proteger y mejorar el uso de recursos naturales al mismo tiempo que se aumente la efectividad de ellos. En relación a esto, el tema de la pérdida de alimentos ha recibido gran atención como una de las características cruciales de los sistemas alimentarios ineficientes a nivel mundial, reducir la pérdida de alimentos a lo largo de la producción y las cadenas de suministro, incluidas las pérdidas post cosecha (FAO, 2016).

¹ Responsable de fotografía: José Eduardo Desiderio Lorenzo.

En este contexto se requiere el desarrollo de nuevas tecnologías que busquen satisfacer la demanda de alimentos actual y en un futuro, impulsando a la población de zonas urbanas a producir sus propios alimentos.

Una alternativa para impulsar la agricultura urbana es la implementación de modelos de producción automatizados, en los cuales el usuario solo tenga que invertir una pequeña parte de su tiempo.

La hidroponía nos permite cultivar alimentos en cualquier lugar, en grandes ciudades se está implementando el uso de luz artificial para sustituir la luz solar.

Actualmente se han tenido grandes avances con la tecnología LED (Diodo Emisor de Luz) en la aplicación de la agricultura urbana, ya que emiten luz brillante y de larga duración con un bajo consumo energético (Yeh y Chung, 2009).

La presente obra consta de ocho capítulos, el primero versa sobre la agricultura urbana, que es uno de los ejes sobre los que se centra el contenido central; el segundo abarca el tema de sistemas de producción sin suelo a fin de que el lector se dé cuenta de la novedad que representa dicho sistema; el tercero muestra las generalidades del cultivo de lechuga; el cuarto hace referencia a los requerimientos edafoclimáticas del cultivo a fin de saber las condiciones óptimas de producción; en el quinto se conceptualizan las soluciones nutritivas; el sexto explica lo referente al sistema de iluminación artificial idónea para un adecuado desarrollo del cultivo; el séptimo capítulo se refiere al modelo que se propone para producir lechugas en zonas urbanas; y en el octavo y último capítulo se desarrolla el funcionamiento del módulo propuesto.

La finalidad de la obra es presentar a productores, investigadores, estudiosos e interesados en el tema un prototipo de tres sistemas de producción automatizado en el cultivo de lechuga en zonas urbanas; así como conocer como la de evaluar el funcionamiento del sistema automatizado para el control y monitoreo del prototipo; analizar las diferencias estadísticas de tres sistemas de producción; y como hay que evaluar las variables morfológicas, materia seca, rendimiento del cultivo y absorción de macronutrientes y micronutrientes, en los tres sistemas de producción.

CAPÍTULO 1

AGRICULTURA URBANA

En la actualidad es de gran importancia retomar los conceptos y actividades agrícolas en zonas urbanas debido al alto grado de crecimiento poblacional que existen en el país y a nivel mundial, Brechelt (2004) menciona a la agricultura urbana como una técnica creada para ciudades; es una forma alternativa de producción y distribución de alimentos que aprovecha los recursos locales disponibles para generar productos de autoconsumo.

En México existen agencias conocidas encargadas de atender problemas del abastecimiento de alimentos agrícolas tal como menciona la FAO (2018), con un incremento continuo de la población en el mundo (casi 821 millones de personas padecieron hambre en 2018).

También existe una problemática de producción en el campo es reportado por la FAO en el (2010) donde indica que ya no hay más tierra cultivable disponible y que de los 1,5 billones de hectáreas en cultivo –sin contar tierras marginales–, cada año se pierden por diferentes causas de 5 a 7 millones de hectáreas.

CAPÍTULO 2

INVESTIGACIONES DE PRODUCCIÓN EN PROTOTIPOS AUTOMATIZADOS DE ZONAS URBANAS

El Instituto de Tecnología de Massachusetts desarrollo la iniciativa de agricultura de interior en la cual crean pequeños espacios para producir alimentos en ciudades, sus avances han sido muy grandes han permitido desarrollar un software de producción donde el productor solo indica las necesidades del cultivo y el propio sistema crea las que requiere la planta (Harper, 2015).

En 2004 la compañía AeroFarms inicio la construcción y operación de granjas de producción de alimentos en zonas urbanas con el fin de garantizar la producción local y ofrecer hortalizas frescas. Ellos emplean luces LED para crear una receta de luz especifica para cada planta, dando a las plantas exactamente el espectro, la intensidad y la frecuencia que necesitan para la fotosíntesis de la manera más eficiente en energía posible. Esta iluminación diseñada nos permite controlar el tamaño, la forma, la textura, el color, el sabor y la nutrición con una precisión nítida y una mayor productividad (Rosenberg, 2005).

Asimismo, empresas como Plenty han apostado por la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para optimizar el rendimiento de sus cultivos verticales. Mediante sensores y algoritmos, el sistema aprende en tiempo real las condiciones óptimas para cada variedad de planta, ajustando de forma automática los nutrientes, la luz y el riego. Este enfoque no solo mejora la eficiencia energética y la sostenibilidad del proceso, sino que también permite reducir significativamente el uso de agua y eliminar la necesidad de pesticidas, lo cual representa una alternativa limpia y segura frente a los métodos agrícolas tradicionales (Torres, 2016).

Por otro lado, la empresa Block farms crea espacios de producción utilizando contenedores especializados, capaces de implementarse en prácticamente cualquier lugar, esto incluye la capacidad de llevar la agricultura a las grandes ciudades, y también a zonas que naturalmente no están destinadas para este propósito como zonas áridas, gracias a la capacidad de climatización controlada de los contenedores que implementan (Alabi, 2007).

Los contenedores incorporan los componentes necesarios para el control de todo el proceso de cultivo de productos, tales como iluminación led, controles automáticos de parámetros adaptados al tipo de cultivo que se requieran, como la temperatura, humedad, CO₂, fertilización y hasta riego (Alabi, 2007).

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SIN SUELO

Por cultivo sin suelo, se entiende cualquier sistema que no emplea el suelo para su desarrollo. Desde un punto de vista práctico, los cultivos hidropónicos pueden clasificarse en: cultivos hidropónicos (Cultivo en agua más nutrientes o sobre materiales inertes) y cultivos en sustrato (cultivo sobre materiales químicamente activos, con capacidad de intercambio catiónico) (Abad *et al.*, 2005).

1 SISTEMA NFT

El sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique), es una de las técnicas más utilizadas en la hidroponía, la cual se basa en la circulación continua o intermitente de una fina lámina de solución nutritiva a través de las raíces del cultivo, sin que éstas por tanto se encuentren inmersas en sustrato alguno, sino que simplemente quedan sostenidas por un canal de cultivo (Castañeda, 1997).

2 SISTEMA DE RAÍZ FLOTANTE

El Sistema de Raíz Flotante, es un método de producción hidropónica que consiste en desarrollar cultivos en agua con una solución nutritiva, sobre una placa de unicel u otro material similar; excluyendo el uso de cualquier tipo de sustrato. Los cultivos desarrollados en un sistema de raíz flotante se caracterizan por el significativo ahorro en el uso de agua, entre 60-70% (Pizarro *et al.*, 2019).

3 SISTEMA AEROPÓNICO

La Aeroponía es una técnica de cultivo moderno, por medio de la cual una planta se desarrolla en un entorno aéreo, las sustancias nutritivas para su adecuado crecimiento se obtienen de un sistema de aspersión continua de nutrientes, aplicados directamente a la raíz de la planta, sin hacer uso del suelo y sin estar sumergida en ningún tipo de sustrato (Rosas, 2012).

CAPÍTULO 4

GENERALIDADES DEL CULTIVO DE LECHUGA

La lechuga (*Lactuca sativa L.*), en sus diferentes formas y colores, es una de las hortalizas más comunes y consumidas en todo el mundo, aunque su principal producción se concentra en zonas más templadas y subtropicales. En la actualidad se cultiva al aire libre e invernaderos, en suelo o en forma hidropónica; esta última evita las limitaciones que provocan las condiciones climáticas, luminosas y de suelo (Kesseli, 1991).

1 ORIGEN DE LA LECHUGA

Antes de la domesticación por los humanos, la lechuga crecía de manera silvestre. Aún no está claro qué especies participaron en la evolución que condujo a la lechuga moderna. Pero hay certera evidencia de que *Lactuca serriola* es uno de los ancestros directos, dado que los cromosomas entre *L. sativa* y *L. serriola* son muy similares morfológicamente y no tienen problemas en cruzarse libremente (Kesseli, 1991).

2 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

La lechuga es una planta anual autógama, que posee una raíz pivotante, relativamente gruesa en la corona que se adelgaza gradualmente en profundidad, la cual puede alcanzar más de 60 cm de profundidad. La mayor densidad de raíces laterales está cerca de la superficie; por lo tanto, la absorción de nutrientes y agua ocurre mayormente en los niveles superiores del suelo (Jackson, 1995).

Las hojas sésiles están distribuidas en forma de espiral, en una roseta densa alrededor de un tallo corto. El desarrollo de la roseta puede continuar durante el periodo vegetativo de la planta como es en el caso de las lechugas de hoja, o formar una cabeza redondeada como en las escarolas y butterhead, o una cabeza elongada como en el caso de Costinas o Romanas (Jackson, 1995).

CAPÍTULO 5

REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS

1 TEMPERATURA

La lechuga es una hortaliza que se cultiva especialmente en regiones templadas y subtropicales. Las condiciones óptimas de temperatura a campo abierto son 17 a 22 °C durante el día y 3 a 12 °C durante la noche (Thompson *et al.*, 1998), como temperatura máxima de crecimiento se puede considerar los 30 °C y como mínima de hasta -1 °C (Jaques y Hernández, 2005).

Bajo condiciones controladas el cultivo de lechuga requiere a partir de los 25 días después del trasplante una temperatura de 22 a 26 °C y posteriormente de 20 a 24 °C hasta la cosecha (Choi *et al.*, 2000).

2 HUMEDAD RELATIVA Y CONCENTRACIÓN DE CO₂

Para el caso de la humedad relativa del ambiental (HR) y concentración de CO₂ los valores recomendados para la producción de cultivo bajo condiciones de interior oscilan desde el 30 % hasta 80 % y de 400ppm hasta 2000 ppm respectivamente (Park *et al.*, 2012)

3 LUZ

Su requerimiento mínimo de intensidad de luz en condiciones de campo abierto es de 107.67 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y un fotoperiodo de 14 a 15 horas luz, bajo condiciones de producción con luz artificial, se requiere una intensidad de luz entre los 200 a 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y un fotoperiodo de 18 y 16 horas respectivamente para obtener una luz integral diaria (LID) mínima de 12 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ y óptima de 17 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ (Yoon y Choi, 2011).

CAPÍTULO 6

SOLUCIÓN NUTRITIVA

Una solución nutritiva (SN) consta de agua adicionada de todos los nutrimentos esenciales en forma iónica para las plantas y, eventualmente, de algunos compuestos orgánicos tales como los quelatos de hierro y de algún otro micronutriente que puede estar presente (Steiner, 1968).

La solución nutritiva es el medio por el cual las plantas en sistemas hidropónicos obtienen los nutrimentos, pero planta no absorbe los nutrimentos en la misma cantidad durante su ciclo, ya que lo hace dependiendo la etapa fenológica y las condiciones climáticas en las que se encuentre, por lo que el equilibrio iónico de la solución nutritiva se adapta al ritmo de absorción de la planta (Adams, 1994).

1 POTENCIAL DE HIDROGENO (PH)

El pH o potencial de Hidrógeno se refiere a la concentración de iones de Hidrogeno (H^+), los cuales determinan el grado de acidez o alcalinidad de una solución.

El pH apropiado de la solución nutritiva para el desarrollo de los cultivos se encuentra entre los valores 5.5 y 6.5; sin embargo, el pH de la solución nutritiva no es estático, ya que depende del CO_2 en el ambiente, de que la solución se encuentre en un contenedor cubierto o descubierto, del ritmo de absorción nutrimental y de la fuente nitrogenada utilizada (De Rijck y Schrevens, 1998).

Steiner (1968), menciona que en una verdadera solución nutritiva se tienen todos los iones en forma libre y activa y que el pH es importante

para determinar la disponibilidad de algunos iones; así, por ejemplo, en un pH alto no es posible tener un contenido alto de iones Ca y PO_4 , debido a la posible precipitación de ambos en forma de compuestos poco solubles del tipo del CaHPO_4 .

El pH es importante para favorecer la presencia de la forma química H_2PO_4 que es la forma del fósforo más fácilmente absorbida por las plantas (Marschner, 1995).

2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

Una de las variables a considerar para el cuidado de los cultivos es la conductividad eléctrica de la solución nutricional. Cuanto más elevada sea la concentración de sales disueltas, mayor será la conductividad eléctrica, por lo que, si ésta se eleva excesivamente, la planta puede sufrir déficit hídrico, semejante al que se produce en condiciones de sequía (Texier, 2013).

La conductividad eléctrica refleja la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica, y está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas y con la cantidad Total de Sólidos Disueltos (TDS), es decir principalmente sales minerales (Texier, 2013).

3 OXÍGENO DISUELTO

Un déficit de oxígeno en la solución recirculante reduce la permeabilidad de las raíces y limita la absorción de agua y nutrientes, con efectos negativos en el rendimiento de los cultivos crecidos en sistemas sin suelo (Vestergaard, 1984).

Zheng *et al.* (2007) indican que un ambiente radical bien oxigenado es esencial para la salud del sistema radical y la prevención de enfermedades radicales.

Raíces saludables, con buen suministro de oxígeno, son capaces de absorber más selectivamente los iones de la solución. La energía metabólica que es requerida para este proceso es obtenida de la respiración radicular,

la cual es inhibida por la falta de oxígeno. Es decir, en sistemas radiculares anaeróbicos, puede haber una pérdida neta de iones (Jackson, 1980).

4 TEMPERATURA

La disponibilidad de oxígeno está muy relacionada con la temperatura, la estrecha correlación entre ella es inversa, de forma que en una disolución nutritiva disminuye el oxígeno disuelto conforme aumenta de temperatura, mientras que el efecto contrario ocurre con la capacidad de difusión del mismo, por lo que en parte estos fenómenos se compensan sin llegar a equilibrarse (Morard y Silvestre, 1996).

CAPÍTULO 7

SISTEMAS DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

1 LA RADIACIÓN SOLAR Y LAS RADIACIONES LUMINOSAS

El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta, libera una gran cantidad de energía que sale hasta la superficie visible del Sol (fotosfera), y escapa en forma de rayos solares al espacio exterior. Más concretamente, hasta la Tierra llega una cantidad de energía solar equivalente a $1,7 \times 10^{14}$ KW, o lo que es lo mismo 10.000 veces el consumo energético mundial (CER, 2014).

2 RELACIÓN DE LA LUZ Y EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS

Las plantas requieren luz a través de toda su vida, desde la germinación hasta la floración y la producción. Así la luz es una onda electromagnética que viaja a través del espacio como paquetes de energía discreta, llamada fotones. Esta puede ser medida de distintas formas, cada fotón tiene una longitud de onda específica y un nivel de energía (Roldán, 2012).

3 CALIDAD DE LUZ

Se refiere a la distribución espectral de la radiación, donde la porción de emisión está en azul, verde, rojo, y otra región visible e invisible de longitud de onda. Para la fotosíntesis, las plantas responden mejor a luz roja y azul. La distribución espectral de la luz también afecta la forma, desarrollo y floración (foto morfogénesis) (Singh *et al.*, 2014).

4 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y LUZ VISIBLE

La región del espectro electromagnético que es captada por el ojo humano tiene longitudes de onda de los 400 nm hasta los 740 nm, estas longitudes controlan diversos aspectos como el crecimiento y el desarrollo (Martin *et al.*, 2010).

6 FOTOSÍNTESIS

Las plantas utilizan el espectro de luz similar al que capta el ojo humano, pero a diferencia de los humanos, éstas captan principalmente la luz roja y la luz azul (Plenet *et al.*, 2000).

La molécula que es capaz de absorber la luz solar y utilizar su energía para transformar el agua y el dióxido de carbono en oxígeno y moléculas orgánicas complejas es la clorofila. A Este proceso se le denomina fotosíntesis (Plenet *et al.*, 2000).

7 RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA (PAR)

Las plantas poseen fotosensibilidad en la que solo una parte de la luz visible interviene en la fotosíntesis esta asimilación de luz o zona PAR es en el rango de 400 – 700 nm, y solo el 45-50% de la energía recibida es aprovechada (Castilla, 2005). La radiación PAR es la energía que participa en la producción de biomasa (Plenet *et al.*, 2000).

8 DURACIÓN DE LUZ

También conocido como fotoperiodo, principalmente afecta la floración. El tiempo de floración en las plantas, puede ser controlado regulando el fotoperiodo, es decir, el tiempo de luz que reciben las plantas (Curtis *et al.*, 2008).

9 FOTOPERIODO Y PUNTO DE SATURACIÓN LUMÍNICA

El fotoperiodo es describe como tiempo de exposición de los cultivos a la luz solar, este se determina por la ubicación geográfica y la estación del año. El fotoperiodo influye en procesos importantes de los cultivos. Aunque el fotoperiodo se ve limitado por lo que se conoce como punto de saturación lumínica en el cual la planta no podrá tener más fotosíntesis y llegará un momento que se mantendrá en un nivel estable y no podrá sobrepasar cierto límite, aunque apliquemos más horas de luz, no habrá un incremento en la producción (Jackson, 2009).

Hay que decir que el este punto de saturación lumínica no solo entra en juego el factor luz, sino que hay otras variables como la cantidad de CO₂, parámetros ambientales (temperatura-humedad), intensidad luz, color de la luz y estado hídrico de la planta que influyen en la determinación de este punto (Jackson, 2009).

Según Maroto (2005) las plantas se clasifican en respuesta al fotoperiodo, en tres grandes grupos:

- Plantas de días cortos.
- Plantas de días largos.
- Plantas neutras.

10 CANTIDAD DE LUZ

Es el número de partículas llamadas fotones y principal parámetro que afecta la fotosíntesis, una reacción fotoquímica dentro de los cloroplastos de las células de las plantas en el que la energía lumínica se utiliza para convertir el CO₂ atmosférico en carbohidratos, de aquí se desprenden dos variables, la intensidad de luz y la luz total diaria, comúnmente conocida como (Daily light integral) (Singh *et al.*, 2014).

11 MEDICIÓN DE LUZ

Las unidades más comunes para medir la luz son pie-candela (Estados Unidos) y lux (Europa). Es importante para los productores

conocer las limitaciones de estas unidades. Ambas proveen una intensidad de luz instantánea en el momento en que se está tomando la medición, así esta única medición no representaría con precisión la cantidad de luz que las plantas reciben durante el día ya que los niveles naturales de luz cambian continuamente de la hora del día y la estación del año (Torres y López 2015).

12 LUZ DIARIA INTEGRADA (DLI)

Luz diaria integrada (DLI) es la cantidad de PAR recibida cada día como función de la intensidad de luz (luz instantánea: $\mu\text{mol.m}^2.\text{segundo}$) y duración por día. Esta unidad es expresada en moles de luz por metro cuadrado por día ($\text{mol.m}^2.\text{día}$), El concepto de DLI es similar a un pluviómetro. De la misma manera que el pluviómetro recolecta el total de lluvia en un lugar específico durante un periodo de tiempo, así también DLI mide el total de PAR recibido en un día (Torres y López 2015).

CAPÍTULO 8

MODELO PARA PRODUCIR LECHUGA EN ZONAS URBANAS

1 ETAPA UNO

De localización: tenemos que asegurarnos de localizar el area urbana donde se pretende producir la lechuga debido a que tenemos que respetar las características que pretende el cultivo mismas que se presentan en este libro.

2 ETAPAS DOS

Consiste en la construcción del módulo de producción, con el objeto de desarrollar e implementar un sistema de monitoreo de variables climáticas por medio de sensores y un sistema de control automático de encendido/apagado de lámparas LED y de la bomba hidráulica.

3 DESARROLLO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

Todo sistema desarrallado para produccion debe cumplir con los objetivos del cuidado adecuado del cultivo y estos depende de diferentes variables y condiciones del entorno en el cual se desarrollan las plantas. En base a esto el éxito depende de lograr mantener los niveles óptimos de cada una de estas condiciones el mayor tiempo posible durante su crecimiento y desarrollo. Estos incluyen la luz recibida por la planta, control de humedad, temperatura ambiental, Conductividad Electrica, pH, nutrientes y temperatura del agua.

4 OBTENCIÓN, CONTROL Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

En la actualidad existen varios sistemas que pueden efectuar el trabajo de controlar sensores, lo recomendable y mas economico utilizado para el control de los sensores son los microcontroladores ATmega2560 estos se encargan de recibir los datos de los sensores y a su vez mandarlos a una placa madre, esta placa puede procesar datos en un software llamado LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), los datos son visibles en forma gráfica y analógica, además el software se encargó de hacer los procesos para el control del módulo de forma automatizada y remota.

5 SENSORES UTILIZADOS

Los sensores para la obtención y el monitoreo del módulo pueden programarse con microcontroladores independientes y registrar las lecturas ambientales como temperatura, humedad relativa, y lecturas de la solución nutritiva como son: la cantidad, temperatura, potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica. También pueden controlar relevadores mediante los cuales se pueden ejecutar el encendido y apagado automatico del sistema de iluminación y del sistema de riego.

6 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Los sensores para monitorear la temperatura y humedad dentro del laboratorio se pueden emplear sensores modelo DHT1; estos sensores tienen un rango de medida de 20-90% para la humedad relativa, con una precisión de $\pm 0.5\%$ y $\pm 1^\circ \text{C}$ para la temperatura. El tiempo de respuesta para la programación desde 1500 milisegundos.

7 SENSOR DE TEMPERATURA

Para monitorear la temperatura de la solución nutritiva fue el modelo ds18b20, los rangos de medición de este sensor son de -50 a 125°C , con una precisión de ± 0.5 grados.

8 SENSOR ULTRASÓNICO

Este sensor fue utilizado para medir la cantidad de agua disponible en el módulo, este sensor tiene un margen de error de 3 milímetros, para la programación de este sensor se requirió de sacar el volumen del contenedor.

9 SENSOR DE POTENCIAL DE HIDROGENO

Potencial de hidrogeno de la solución nutritiva es posible utilizar el modelo PH-4502C que funcionan con ayuda de un electrodo E201-BNC por medio de un conector BNC. El voltaje de alimentación es de 5V lo cual lo hace compatible con microcontroladores. El rango de detección que tiene cada uno de ellos es de 0- 14, con una variable de respuesta de 2500 milisegundos. Para ello es necesario calibrar los sensores en solución buffer de 4.00 y 7.00.

10 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

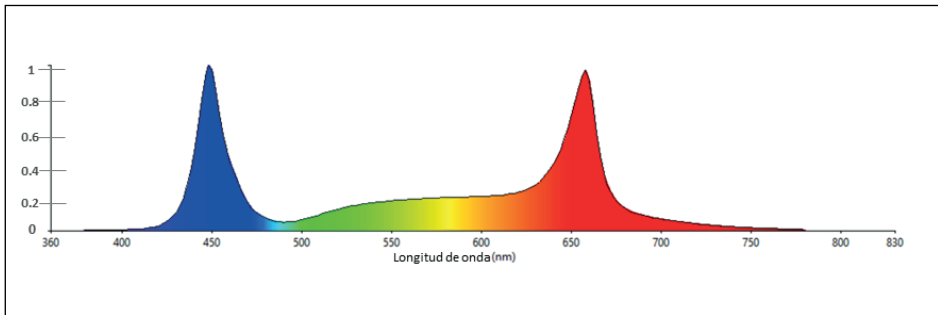
Para determinar la conductividad eléctrica el sensor TDS meter el cual nos entrega valores en $\mu\text{S cm}^{-1}$ con un rango de error de $\pm 0.5\%$, para la calibración de este sensor es necesaria una solución buffer a una concentración de $12880 \mu\text{S cm}^{-1}$.

11 SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Es importante mantener una adecuada iluminación en el área de trabajo por lo que en ambientes cerrados donde se pretenda establecer el cultivo se pueden utilizar leds de espectro completo de 50 watts, sostenidos en disipadores de 15×15 cm y utilizar ventiladores (12 voltios). Además, considerar lámparas de luz led de tubos de luz fría de 6500 Kelvin. con ello se puede lograr longitudes de onda necesarias para el desarrollo del cultivo que van desde 450 a 750 nanómetros (Figura 1). Además, es

posible alcanzar una cantidad de 10,000 Luxes a nivel de la base, con esto se disminuyen problemas de etiolación del cultivo.

Figura 1. Longitud de onda obtenida con la combinación de leds.



12 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE PRODUCCIÓN

Con base en la construcción tradicional de una estructura vertical de varios pisos, es posible crear un módulo con un total de 3 niveles con separación de 0.60 m y superficie de 0.72 m². lo que indica que puede ser adaptado en cualquier espacio en la ciudad.

El modulo se puede conformar por un sistema de producción diferente, para ello se conocen tres sistemas: el sistema NFT compuesto por tubos de policloruro de vinilo (PVC) de 152 mm de diámetro color blanco (con ello se puede obtener un reflexión difusa y de esta manera proporcionar mejores condiciones de luz para las plantas) la longitud propuesta para este modulo es de de 1.20 m, con separación entre centros de 0.20 m, para la perforación de los tubos se utiliza una broca sacabocados de 52 mm, los tubos pueden ser perforados con una separación de 20 – 25 centímetros de separación de centro a centro. la Por medio de una electroválvula colocada en el costado para que recircule hacia el otro costado donde regresa a través de una brida de ½ pulgada al tanque de almacenamiento, el tanque de almacenamiento echo de fibra de vidrio de 60 de ancho por 120 cm de largo y 60 cm de altura colocado en la parte de abajo y por medio electroválvulas que distribuyen por medio de conectores con gomas, codos, tee´s y manguera de polietileno color negro de 16 mm de diámetro

y recircular para que pueda regresar a través de un tubo recolector de 1 pulgada al tanque de almacenamiento.

El segundo es el sistema de raíz flotante está puede estar fabricado en fibra de vidrio o plástico con medidas de 60 cm de ancho por 120 cm de largo y 12 cm de altura debe contener anticorrosivo de color negro con la finalidad de evitar el desarrollo de algas y utilizar para el sosten de las plantas se puede utilizar una placa de unigel de 1.5 cm de ancho con 24 cavidades este metodo tambien utilizaria el tanque de alamacenamiento anterior.

El tercero es el aeropónico, en este sistema al igual que el de raíz flotante se puede utilizar un tanque de fibra de vidrio de 60 de ancho por 120 cm de largo y 60 cm de altura, aunque con este sistema disminuye a dos niveles de producción el modulo. El tanque se recubre con una placa de unigel de 1.5 cm de ancho con 24 cavidades, la solución nutritiva en este modelo es inyectada por medio de electroválvulas y 8 nebulizadores de 4 salidas, en este tratamiento la solución cae directamente al tanque de almacenamiento en cada tanque se almacena la solución nutritiva y es inyectada directamente y cae al tanque de almacenamiento.

Tambien se puede utilizar en conjunto los tres sistemas de produccion en uno solo como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Prototipo de producción.



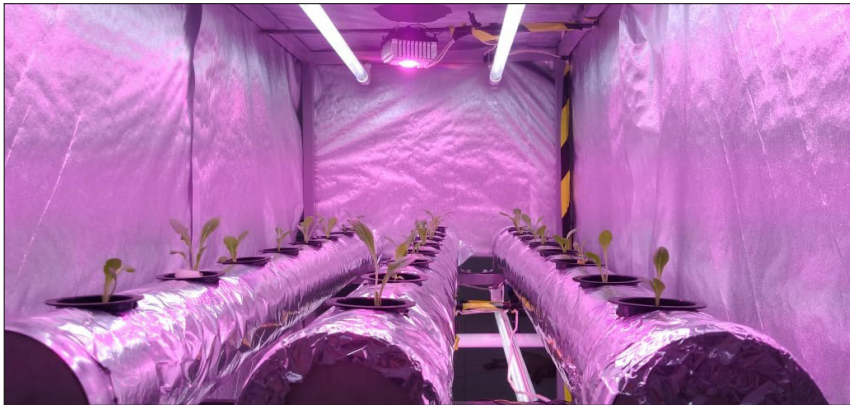
CAPÍTULO 9

PRODUCCION EN CULTIVO DE LECHUGA CON LOS TRES SISTEMAS

1 MATERIAL BIOLÓGICO

Para el caso que nos ocupa se emplearon semillas de lechuga (*Lactuca sativa L*) variedad Parris Island (lechuga orejona), las cuales fueron sembradas en charolas de espuma agrícola, con bloques de 2.5 * 2.5 cm, las charolas se mantuvieron con niveles altos de humedad para evitar estrés hídrico y se almacenaron en un lugar con una luminosidad de entre 1200 luxes, esto con la finalidad de acelerar la germinación.

Figura 3. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) 15 días después del trasplante al tratamiento NFT.



2 SOLUCIÓN NUTRITIVA

La solución nutritiva empleada para la nutrición del cultivo (Cuadro 1) fue la propuesta por Steiner (2011) modificada por Cabezas (2011), para su elaboración se utilizaron fertilizantes comerciales y se midieron los

parámetros de potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica previo a su elaboración.

Cuadro 1. Cantidad de fertilizantes empleados para la solución nutritiva para preparar 1000 litros de solución.

Elemento	Concentración (ppm)	Fuente	Nombre comercial
N	210	****	****
P	50	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	Fosfato monoamónico
K	240	KNO_3	Nitrato de potasio
Ca	200	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Nitrato de calcio
Mg	45	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	Nitrato de magnesio
S	70	MgSO_4	Sulfato de magnesio
Fe	2	****	Ultrasol micro mix
Mn	0.8	****	Ultrasol micro mix
B	0.5	****	Ultrasol micro mix
Cu	0.15	****	Ultrasol micro mix
Zn	0.15	****	Ultrasol micro mix
Mo	0.1	****	Ultrasol micro mix

Los parámetros que se midieron para que el cultivo de lechuga pueda asimilar la solución son:

- Conductividad eléctrica: de 1.5 a 2.5 $\mu\text{S cm}^{-1}$
- Solidos disueltos (TDS): entre 650 y 1500 PPM
- pH: entre 5.5 y 6.5
- Temperatura: entre 15 y 24 ° C

3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño utilizado fue bloques completos al azar, se evaluaron tres tratamientos y nueve repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta de lechuga.

4 VARIABLES EVALUADAS

4.1 VARIABLES DE AMBIENTALES

Se midieron variables de la temperatura ambiental (° C) y la humedad relativa (%) con el sensor DHT11, además el sistema guardó variables de la solución nutritiva como temperatura, conductividad eléctrica y potencial de hidrogeno, los datos fueron almacenados en la memoria de la computadora cada 15 minutos desde el día 1 hasta el día 60 que se realizó el corte del cultivo (Anexo 1).

4.2 DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ

Se realizó un mapeo de la distribución de la luz, utilizando un luxómetro portátil de la marca UNI-T el cual arrojó los resultados en luxes, las mediciones se hicieron en cada orificio donde se establecieron las plantas, posteriormente se empleó el programa Surfer versión 20.1 para la creación del mapa de la distribución.

4.3 VARIABLES DE ABSORCIÓN DE MACRONUTRIENTES Y MICRONUTRIENTES

La absorción nutrimental se determinó realizando un análisis de tejido foliar en el laboratorio Fertilab (Anexo 2,3 y 4), Para realizar el análisis mencionado se enviaron 200 gramos de hojas frescas de cada tratamiento, se seleccionaron aleatoriamente las hojas de edad media, posteriormente se empaquetaron en bolsas de papel de 20 * 40 centímetros y se les colocó una etiqueta con la información del tratamiento. Las metodologías que emplea el laboratorio para determinar la absorción nutrimental son Dumas para Nitrógeno (N), Nitración con ácido salicílico con espectrofotometría para determinar Nitratos (N-NO₃) y digestión multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03 para P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe y Mn.

4.4 VARIABLES MORFOLÓGICAS

El día de la cosecha se midieron las variables morfológicas de las plantas (Anexo 5), las variables medidas fueron peso fresco de la parte foliar y la raíz empleando una báscula granataria digital, numero de hojas, altura de la planta, diámetro del tallo, longitud del tallo y longitud de raíz. Las muestras de cada planta fueron secadas en estufa a 110°C durante 72 horas, posteriormente fueron pesadas para determinar peso seco de la parte aérea y de raíz.

Figura 4. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) a 60 días después del trasplante.



Figura 5. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) a 60 días después del trasplante producida bajo el prototipo a una intensidad de luz de 5000 a 12200lux.



4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para realizar el análisis estadístico se empleó el programa estadístico SAS (Statistical Analysis Software), para realizar análisis de varianza y pruebas de comparación de medias por el método de Tukey ($P \leq 0.05$).

CAPÍTULO 10

FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO

Los resultados obtenidos de las pruebas que se le hicieron al prototipo (Figura 4) fueron las esperadas para llevar a cabo nuestra investigación, durante dichas pruebas se evaluó el correcto funcionamiento de las lámparas led de acuerdo al fotoperiodo deseado, Además se realizaron ensayos para conocer si el sistema de riego era eficaz en cada tratamiento.

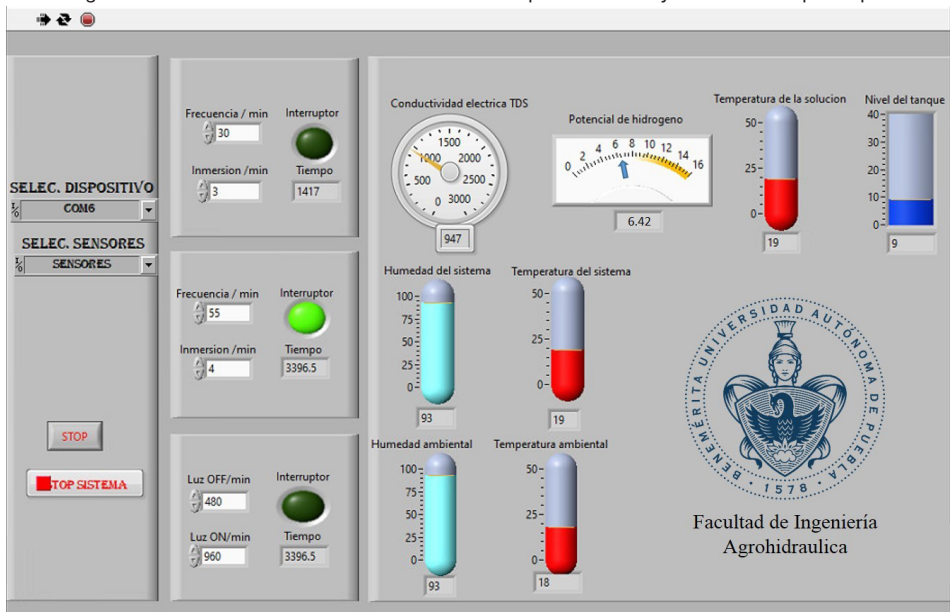
Figura 6. Evaluación del prototipo de producción.



1 PROGRAMA CREADO PARA EL MONITOREO Y CONTROL DEL MÓDULO

El programa elaborado permitió monitorear y controlar el módulo de forma automatizada, el funcionamiento se basa principalmente en los conocimientos del usuario para programar las frecuencias de riego y el fotoperiodo deseado en el cultivo de lechuga dependiendo de la etapa fenológica. Este programa tiene como ventaja almacenar los datos recolectados por los sensores desde el día de siembra hasta el día de cosecha del cultivo. En la Figura 5, se observa el panel de control del programa, este panel es práctico para que el usuario lo logre entender.

Figura 7. Panel de control del sistema automatizado para el control y monitoreo del prototipo.



2 RESPUESTA DE LOS SENSORES EMPLEADOS

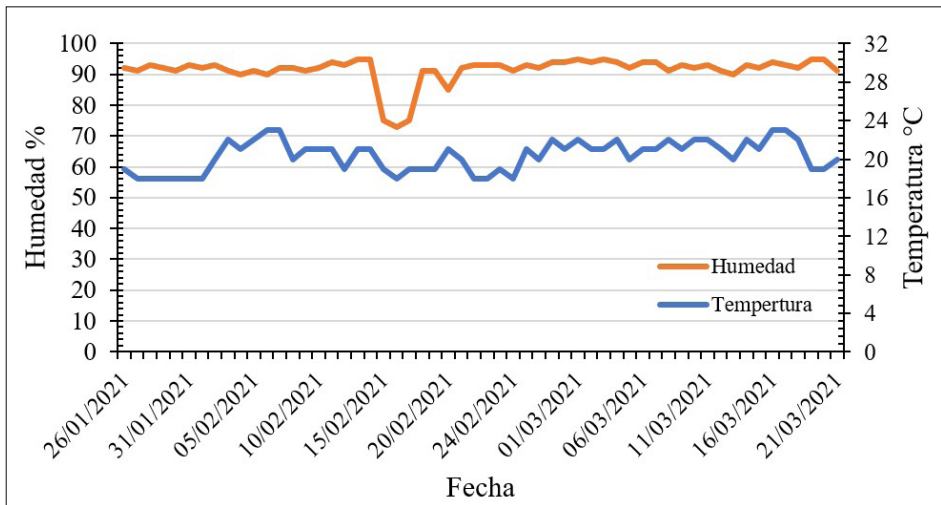
2.1 TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Los resultados obtenidos con el sensor de temperatura y humedad ambiental DHT11 se muestran en la Figura 6, donde se pudo observar que las condiciones de temperatura dentro del laboratorio se mantuvieron

en el rango de 18 a 23°C, con un promedio aproximado de 20.5°C y las condiciones de humedad relativa se mantuvieron entre 88 y 95%. Los valores de temperatura están dentro del rango reportado por Choi *et al.*, (2000) donde señala que hasta los 25 días después de trasplante, la temperatura óptima para el crecimiento de lechuga bajo condiciones de laboratorio es de 18 a 26 °C y posteriormente de 20 a 24 °C hasta la cosecha.

Mientras que los valores de humedad relativa no se encontraron dentro del rango establecido por Park *et al.*, (2012), quienes señalan que las condiciones óptimas de humedad relativa en condiciones de laboratorio son de 60-80%, además señalan que altos niveles de humedad relativa fomentan problemas de enfermedades, con los valores de humedad relativa obtenidos dentro del laboratorio no se registró incidencia de enfermedades.

Figura 8. Datos de temperatura y humedad relativa obtenidos con el sensor DHT11 durante todo el ciclo del cultivo.

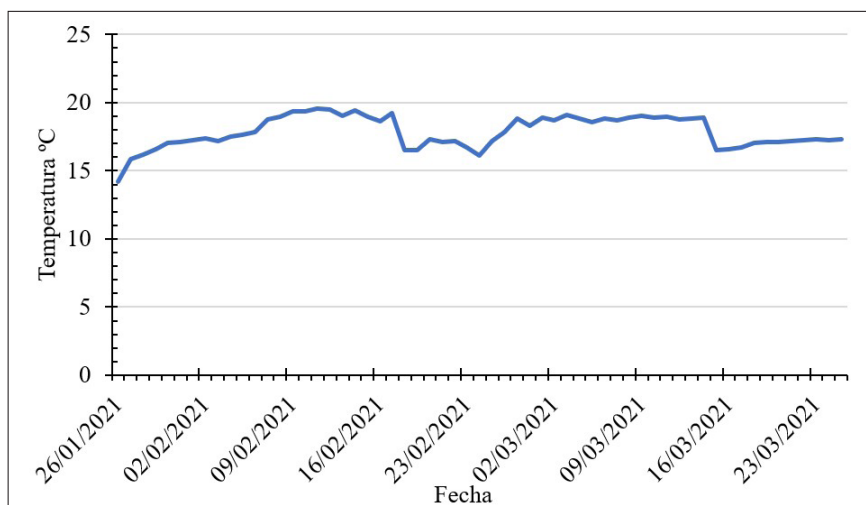


2.2 TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

Los resultados obtenidos con el sensor de temperatura ds18b20 se muestran en la Figura 7, donde se observa que las condiciones de temperatura de la solución nutritiva se manienen en el rango de 14 a

19.5°C, con un promedio aproximado de 16.5°C, Estos valores concuerdan con lo propuesto por Magalhães y Huber (1999) quienes recomiendan que la temperatura de la solución nutritiva no exeda los 20°C, ya que la temperatura afecta principalmente al contenido de oxígeno disuelto en la solución nutritiva (Vestergaard, 1984).

Figura 9. Datos de temperatura de la solución nutritiva obtenidos por el sensor ds18b20 durante el ciclo del cultivo.



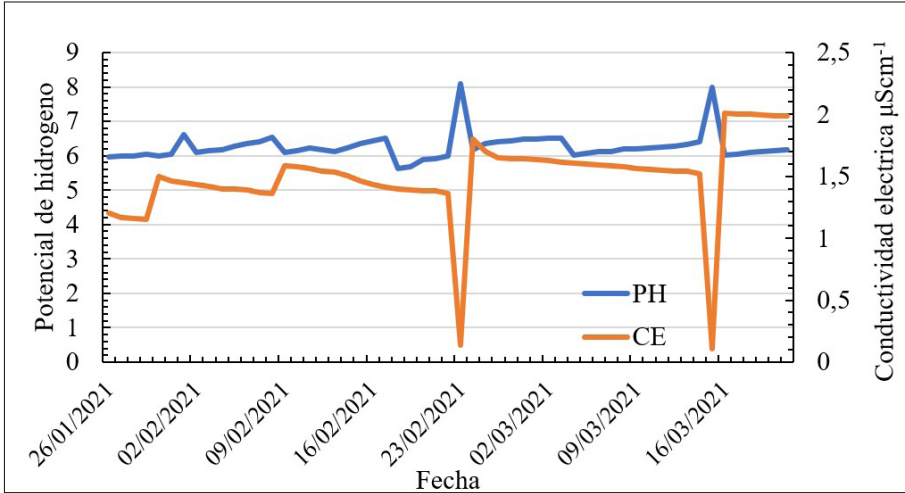
2.3 POTENCIAL DE HIDROGENO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los resultados obtenidos con el sensor de potencial de hidrogeno PH-4502C y el sensor de conductividad eléctrica se muestran en la Figura 8, donde se observa que las condiciones de pH de la solución nutritiva se mantienen en el rango de 6.3 a 8.1, dándose los valores más altos cuando se realizó lavado de raíz, la tendencia del pH fue a aumentar su alcalinidad por lo que se tuvo que aplicar ácido sulfúrico 1N como recomienda Rodríguez *et al.*, (2006), estos valores concuerdan con lo reportado por Shimizu *et al.*, (2011) quien mencionan que para la producción de lechuga se recomienda mantener un pH entre un rango de 5.5 a 6.5.

Las condiciones de conductividad eléctrica se mantuvieron entre 0.11 a 2.1, dándose el resultado más bajo cuando se realizó lavado de raíz. Estos valores concuerdan con lo propuesto por Prieto (2008)

quien menciona que durante los primeros 8 días después del trasplante la solución se debe suministrar al 25%, posteriormente incrementar la concentración del 100%.

Figura 10. Datos de conductividad eléctrica y potencial hidrogeno obtenidos de la solución nutritiva

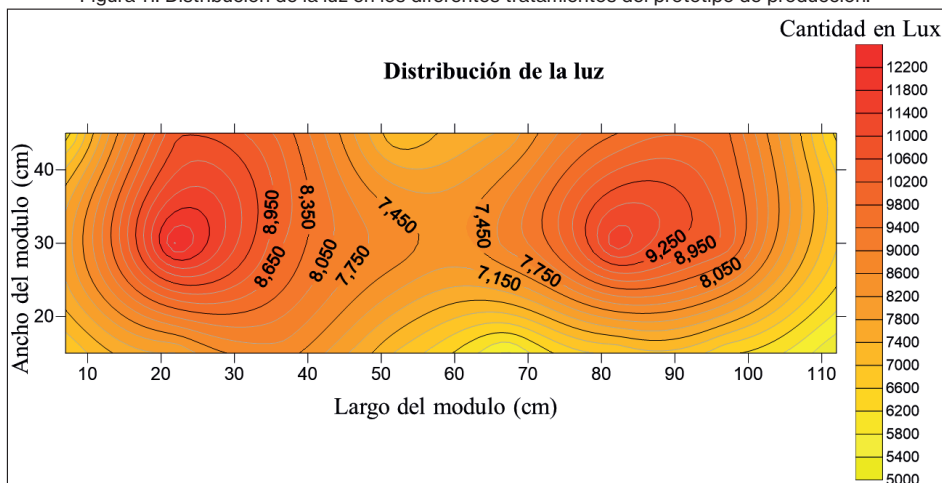


3 DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ

La distribución de la luz obtenida en nuestro sistema para los tres tratamientos fue entre un rango de 12200 y 5000 luxes, el rango mayor se presentó principalmente en las zonas donde se colocó el led y el rango mejor en las orillas del módulo, Alpi y Tognoni (1999) indican que el rango de luminosidad para la producción del cultivo de lechuga debe comprender entre 10000 a 30000 luxes bajo condiciones de invernadero.

Los resultados obtenidos en nuestra investigación concuerdan con los obtenidos por Bantis *et al.*, (2016) quien realizó una investigación aplicando luminosidades de entre 5000 y 10000 luxes, teniendo como resultado que el cultivo de lechuga se adapta mejor a luminosidades de 8000 luxes bajo sistemas de producción con luz artificial.

Figura 11. Distribución de la luz en los diferentes tratamientos del prototipo de producción.



4 ABSORCIÓN NUTRIMENTAL

Los tratamientos mostraron diferencias en la absorción total de nutrimentos (Figura 9 - 10), destacando el t1 con los mayores valores de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn en comparación a los observados en el t2 y t3, esto debido a un mayor crecimiento en la parte aérea del cultivo (Johkan *et al.*, 2012).

Nuestros resultados del análisis foliar están dentro del rango reportado por Rodríguez y Rodríguez (2015) quienes indican que la concentración nutrimental óptima en hojas para el cultivo de lechuga es de 4.7 a 5.5 % para N, 0.5 a 1.0 % para P, 7.5 a 9.0 % para K, 1.0 a 3.0 % para Ca, 0.2 a 0.8 % para Mg, 100 a 180 ppm para Fe, 40 a 80 ppm para Zn, 155 a 250 ppm para Mn, 5 a 25 ppm para Cu y 40 a 100 ppm para B (Rodríguez y Rodríguez, 2015), siendo el t3 el que no cumple los requerimientos para K y Fe.

Figura 12. Absorción total de macronutrientes del cultivo de lechuga a 60 días después del trasplante.

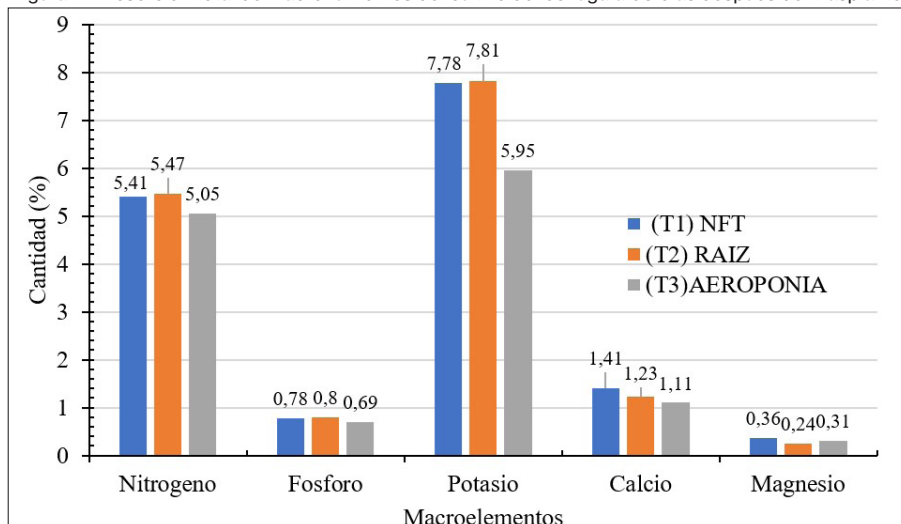
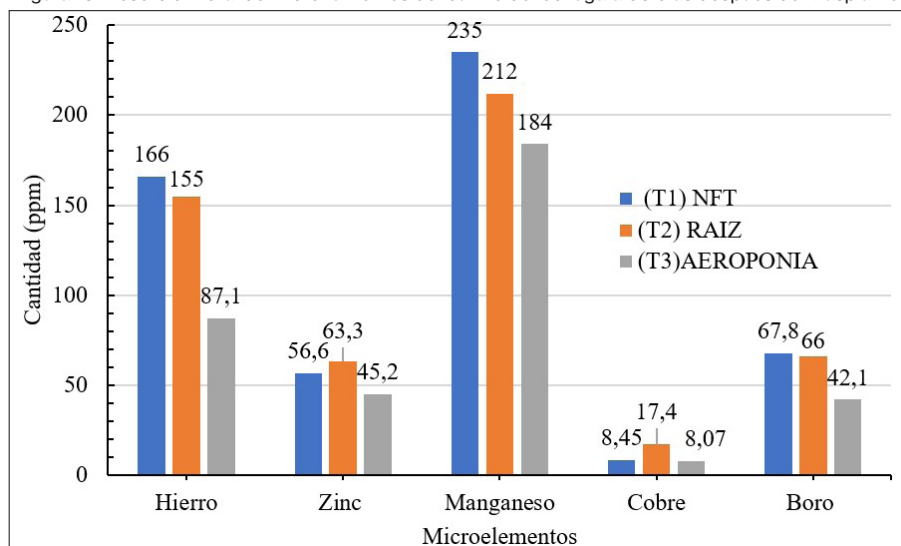


Figura 13. Absorción total de micronutrientes del cultivo de lechuga a 60 días después del trasplante.



5 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS EN LECHUGA

En el análisis realizado de las características morfológicas, la biomasa y el rendimiento del cultivo, se obtuvieron diferencias significativas entre genotipos en todas las variables estudiadas (Cuadro 1).

Cuadro 2. Cuadro medio del análisis de varianza para las variables de fenología, biomasa y el rendimiento en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de laboratorio.

Variables	Fuentes de variación		CV (%)
	Genotipo	Error	
PFP (g)	32542.5 **	1584.2	23.59
PFR (g)	304.64 **	42.68	36.27
PFT (g)	37074.9 **	1679.98	22.04
PSP (g)	114.27 **	5.19	22.05
PSR (g)	12.18 **	1.71	36.54
PST (g)	179.8 **	8.42	20.84
NH	406.29 **	12.25	16.6
AP (cm)	73.43 **	5.34	9.27
DT (cm)	0.57 **	0.05	19.35
LT (cm)	2.86 **	0.34	25.41
LR (cm)	1244.68 **	65.86	18.81

ns, *, **: No significativo y significativo a una $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente. CV: Coeficiente variación. PFP: Peso fresco de la planta; PFR: Peso fresco de la raíz; PFT: Peso fresco total; PSP: Peso seco de planta; PSR: Peso seco de la raíz; PST: Peso seco total; NH: Numero de hojas; AP: Altura de la planta; DT: Diámetro del tallo; LT: Longitud del tallo; LR: Longitud de raíz.

Lo que indica que, en cada carácter estudiado, al menos un genotipo mostró una respuesta significativa diferente a los demás, esto se puede atribuir a que en cada genotipo existe un comportamiento diferencial del cultivo (Howard, 1997).

6 RENDIMIENTO Y BIOMASA DEL CULTIVO DE LECHUGA

El comportamiento del rendimiento fue diferencial entre tratamientos (Tabla 3), El peso fresco total (PFT) se obtuvo sumando el peso fresco de la planta (PFP) más el peso fresco de raíz (PFR), donde se pudo observar que para la variable de peso fresco total fue mayor en el T1 con un promedio de 208.73 g por planta, tratamiento que es estadísticamente igual al T2 con un promedio de 200.73 g por planta de acuerdo a la prueba de Tukey $P \leq 0.05$, estos valores concuerdan con Mota *et al.*, (2003) quien menciona que a

los 60 días después del trasplante el peso fresco comercial de la lechuga es de 180 – 460 gramos. En base al tratamiento 3 Neumann (1997) indica que la tasa del rendimiento se ve afectada por el suministro subóptimo de nutrientes podría afectar la tasa de crecimiento de las hojas por la inhibición de la tasa de producción y expansión de nuevas hojas.

Cuadro 3. Comparación de medias para las variables de rendimiento y biomasa en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) bajo condiciones de laboratorio.

Tratamiento	FPF	PFR	PFT	PSP	PSR	PST
NFT	208.73 a ²	16.18 b	224.91 a	12.49 a	3.22 b	15.73 a
Raíz flotante	200.73 a	24.86 a	225.59 a	12.53 a	4.96 a	17.5 a
Aeroponía	94.48 b	12.92 b	107.4 b	5.96 b	2.57 b	8.55 b
DMSH	50.162	8.22	51.65	2.87	1.65	3.65

²Valores con la misma letra dentro de las columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$. NFT: Nutrient Film Technique; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. FPF: Peso fresco de la planta; PFR: Peso fresco de la raíz; PFT: Peso fresco total; PSP: Peso seco de planta; PSR: Peso seco de la raíz; PST: Peso seco total.

La biomasa al igual que el rendimiento tuvo un comportamiento diferencial entre los diferentes genotipos, los tratamientos 1 y 2 no tuvieron diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), estos resultados muestran la habilidad que tuvo el cultivo para acumular biomasa en los distintos tratamientos, como mencionan Rajwade *et al.*, (2001) que esto puede ser atribuido al grado de adaptabilidad que muestran los cultivos en las diferentes condiciones de cada sistema de producción.

El tratamiento 3 fue el que generó menos biomasa al final del periodo de evaluación, Manrique y Bartholomew (1991), mencionan que la acumulación de biomasa depende de la cinética de crecimiento y de la tasa de distribución, que están gobernadas por el área foliar y asimilación de nutrimentos.

7 VARIABLES MORFOLÓGICAS

El número de hojas dentro de los tres tratamientos fue diferente, el tratamiento 2 fue el que mostró un mayor contenido de hojas, seguido por

el tratamiento 1, estos valores concuerdan con Repke *et al.*, (2009) quien menciona que el número de hojas promedio para el cultivo de lechuga tipo italiana van de 20 hasta 31 hojas por planta. En la altura de la planta y el diámetro del tallo para los tratamientos 1 y 2 no se observaron diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), estos valores fueron superiores a los obtenidos por Cazorla (2010), quien obtuvo valores de altura de planta y diámetro del tallo de 24.54 y 1.2 respectivamente bajo este sistema de producción.

Cuadro 4. Comparación de medias para las variables morfológicas en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de laboratorio.

Tratamiento	NH	AP	DT	LT	LR
NFT	21.25 b ^z	27.25 a	1.47 a	2.22 ab	31.25 c
Raíz flotante	29.12 a	27.01 a	1.35 a	2.95 b	42.05 b
Aeroponía	13.87 c	21.88 b	0.96 b	2.95 a	56.12 a
DMSH	4.41	2.96	0.3	0.74	10.22

^zvalores con la misma letra dentro de las columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$. NFT: Nutrient Film Technique; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. NH: Numero de hojas; AP: Altura de la planta; DT: Diámetro del tallo; LT: Longitud del tallo; LR: Longitud de raíz.

El comportamiento de la longitud del tallo de los tres tratamientos fue similar a lo reportado por Kander (2002) quien obtuvo valores de 2 – 3.5 cm en un modelo de producción con luz artificial, estos resultados se atribuyen a que el contenedor en los tres tratamientos fue del mismo tamaño. La longitud de raíz fue diferencial para los 3 tratamientos donde se pudo observar que el crecimiento de la raíz en el T3 fue 55% - 75% mayor que el T1 y T2 respectivamente, Montero y Cerdas (2004) señala que en los sistemas de producción aeropónicos la longitud de la raíz es mayor que en los métodos usados en el T1 y T2, esto a que existe mayor espacio en la cabina donde nebuliza la solución nutritiva. En esta investigación las variables morfológicas NH, AP y LT del T3 su comportamiento fue diferencial a los demás tratamientos, esto puede ser atribuido a lo mencionado por Brenes (2010) donde señala que la edad para realizar el trasplante de la lechuga a sistemas de producción es a los 20 días después de ser germinada y en nuestro sistema lo hicimos a los 6 días.

CAPÍTULO 11

REFLEXION FINAL

El prototipo desarrollado funcionó según lo esperado y en base a esto se afirma que el sistema automatizado y el prototipo tienen la capacidad de ser implementados en zonas urbanas, a gran escala de manera industrial o bien en súper mercados.

Dentro de los sistemas evaluados en el sistema NFT (Nutrient Film Technique), fue en el que mejor se adaptó el cultivo de lechuga, logrando resultados a 60 días después del trasplante, con rendimientos de 5.2 Kg m²⁻¹.

El prototipo posee ventajas desde un punto de vista ambiental ya que aprovecha de mejor manera el recurso hídrico, elimina el uso de plaguicidas, reduce la cantidad de fertilizante y no degrada el suelo.

LITERATURA CITADA

Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Fertirrigación en cultivos hortícolas, frutales y ornamentales En: Cadahia, C. (Ed.) Madrid: Ed. Mundi-Prensa. 681p.

Adams, P. 1994. Nutrition of greenhouse vegetables in NFT and hidroponic systems. Acta Hort. 361: 245-257.

Alabi, R. 2007. Improving the Technical Efficiency of Nigeria cocoa Farmers through institutional farm credit. Afr Agric Res 4: 22-23.

Alpi A. y Tognoni F. 1999. Cultivos en invernadero. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 347 p.

Bantis, F., T. Ouzounis R. and K. Radoglou. 2016. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. Scientia Horticulturae. 198 (3): 277-283.

Brechelt, A. 2004. El manejo ecológico de plagas y sus enfermedades, Fundación Agricultura Medio Ambiente (FAMA) Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina (RAP-AL) Santiago de Chile. 285p.

Brenes, L. 2010. Análisis Multicriterio de sistemas de producción de lechuga. Costa Rica: Curso Tópicos Avanzados de Gerencia y Gestión Ambiental. Maestría en Gerencia y Gestión Ambiental. Centro Interamericano de Posgrados. 367p.

Castañeda, F. 1997. Manual Técnico de Hidroponía Popular. Cultivos sin tierra. 104 p.

Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico, tecnología y manejo. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 37 (62): 83-136.

Cazorla, A. 2010. Estudio bioagronómico de catorce cultivares de lechuga tipo mantecosa (*Lactuca sativa* L.) en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. Tesis Ingeniero Agrónomo. Escuela de Ingeniería Agronómica. Riobamba, Ecuador. 90 p.

CER. 2014. Energía solar. Centro de Energías Renovables. Ministerio de Energía. Santiago, Chile. 28p.

Choi, K. Y., Paek, K. Y., and Lee, Y. B. 2000. Effect of air temperature on tip burn incidence of butterhead and leaf lettuce in a plant factory. In *Transplant Production in the 21st Century*. Springer Netherlands. pp. 166-171.

Curtis, H., Barnes, S., Schnek, A., and Massarini, A. 2008. *Curtis. Biología*. Buenos Aires: Ed. Médica Panamericana. 1160ed.

De Rijck, G. y E. Schrevens. 1998a. Cationic specification in nutrient solution as a function of pH. *J. Plant Nutr.* 21 (5): 861-870.

FAO. 2006. *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.

FAO. 2010. *El segundo informe sobre el estado de los recursos filogenéticos para la alimentación y la agricultura en el mundo*. Roma, 318 p.

FAO. 2016. *Desarrollo de cadenas de valor sensibles al género*. Marco de referencia. Roma. Disponible en: www.fao.org/3/a-i6462e.pdf

FAO. 2018. *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo*. Roma. 218 p.

Harper, C. and Siller M. 2015. OpenAG: a globally distributed network of food computing. *Pervasive Comput.* 14(4):24–27.

Howard, M. 1997, *Cultivos Hidropónicos, Nuevas técnicas de Producción*. Departamento de Ciencia de las Plantas. Universidad de la Columbia Británica, Vancouver, 2001, Editorial Mundi Prensa.

Jackson, L. E. 1995. Root architecture in cultivated and wild lettuce (*Lactuca* spp.). *Plant, Cell and Environ.* Vol. 18 (Nº 8). pp. 885-897.

Jackson, M. B., 1980. Aeration in the nutrient film technique of glasshouse crop production and the importance of oxygen, ethylene and carbon dioxide. *Acta Hort.* Vol. 98: 61 - 75.

Jackson, S.D. 2009. Plant responses to photoperiod. *New phytologist* 181: 517-531.

Jaques, H. C., and Hernández, J. L. 2005. Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*, 3: 11-16.

Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hahida, S. N., and Yoshihara, T. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75: 128-133.

Kander, A.A., 2002. Quality parameters of fresh- cut fruit and vegetable products. En: Lamikanra O. (ed), *Fresh-Cut Fruits and Vegetables: Science. Technology and Market* CRC press. Florida. pp 12 -19.

Kesseli, R., Ochoa, O. and Michelmore, R. (1991). Variation at AFLP loci in *Lactuca* spp. and origin of cultivated lettuce (*L. sativa*). *Genome* 34 (Nº 3):430-436.

Magalhães J., D. Huber M. 1999. Maize Growth and Ammonium Assimilation Enzyme Activity in Response to Nitrogen Forms and pH Control. *J. Plant Nutr.* 12:985-996.

Manrique, L. A., Bartholomew, D. P. 1991. Growth and yield performance of potato grown at three elevations in Hawaii: II. Dry matter production and efficiency of partitioning. *Crop Sci.* 31.

Maroto, J. 2005. Elementos de horticultura general. Mundi-Prensa.

Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Segunda ed. Academic Press. San Diego, CA, EEUU. 889 pp.

Martín, P., Navas, L., Hernandez, S., Correa, A., Martín, J., Martín, E., y Duran, J. 2010. Diodos emisores de luz para la irradiación de plantas. Colombia. 130p.

Montero, M. y Cerdas, M. 2004. Guías técnicas del manejo poscosecha de apio y lechuga para el mercado fresco. San José, Costa Rica. MAG. 72p.

Morard E, Silvestre J 1996. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: a review. *Plant Soil* 184: 243- 254.

Mota, J.; Yuri, J.; de Freitas, S.; Rodriguez, J.; de Resende, G. y de Souza. R. 2003. Avaliação de cultivares de alface Americana durante o verão em Santanada Vargem, MG. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 21: 234-237.

Neumann, P. 1997. Salinity resistance and plant growth revisited. *Plant Cell Environ.* 20: 1193-1198.

ONU. 2018. Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Nueva York, 2018. [edición electrónica].

Park, G. Y., Park, E. J., Hwang, J. S., and Jeong, R. V. 2012. Light source and CO2 concentration affect growth and anthocyanin content of lettuce under controlled environment. *Journal Horticulture, Environment and Biotechnology*, 53: 460-466.

Pizarro, V., Jana, C., Ibacache, G., 2019. Módulos Hidropónicos Sistema Raíz Flotante (SRF): producción de lechugas y berros bajo invernadero. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, INIA Intihuasi, Colina San Joaquín s/n, La Serena.12: 234-256.

Plenet, D., A Mollier y S. Pellerin. 2000. Grow analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *plant soil.* 224: 259-272.

Prieto, D. 2008. Riego con aguas salinas y aguas de drenaje, control e impacto de salinidad. Jornadas sobre "Ambiente y riego: modernización y ambientalidad", La antigua, Guatemala. Red de riegos. CYTED y AECI.

Rajwade, V. B.; Banafar, R. and Pathak, A.C., 2001. Growth analysis of potato in relation to biodynamic package and organic manures with chemical fertilizers. J. Indian Potato Assoc.156 p.

Repke, A.; Velozo, M.; Domingues, M. y Rodriguez J. 2009. Efeitos da aplicação de reguladores vegetais na cultura da alface (*Lactuca sativa*) crespa var. Verônica e americana var. Lucy Brow.

Rodríguez, H. y Rodríguez Absi, J. 2015. Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación. México: Trillas S.A. de C.V.

Rodríguez, H., Rodríguez, J. C., Vidales, J. A. y Luna, A. I. 2016. Cultivo hidropónico de *Lilium* (Azucena): para flor de corte y en maceta. México: Trillas S.A. de C.V.

Roldán, J. 2012. Estudios de viabilidad de instalaciones solares. Determinación del potencial solar. España: Paraninfo.

Rosas, A. 2012. Agricultura Limpia. Bogotá D.C, Colombia: Mafpac Impresores. Simplemente Hydro. Copyright 2008 recuperado de http://www.simplyhydro.com/aero_hydro.htm.

Rosenberg, D. 2005. Diseño de led encendiendo soluciones para nuevas aplicaciones. Aerofarms. pp.12-14.

Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., and Ohdoi, K. 2011. Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. IFAC Proceedings Volumes, 44(1): 605-609.

Singh, D., 2014. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting. Recuperado de <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>.

Steiner, A., 1968. Soilless culture. En Proc. 6th Colloq. Int. Potash Inst. Florence, Italy. pp. 324-341.

Texier, W., 2013. Hidroponia para todos. Todo sobre la horticultura en casa. Editorial Mama editions. Paris, Francia. 304p.

Thompson, H. C., Langhans, R. W., Both, A. J., and Albright, L. D. 1998. Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system. Journal of the American Society for Horticultural Science, 123, 361-364.

Torres P., G. López. 2012. Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos. Departamento de Horticultura y Arquitectura de Áreas Verdes, Purdue University. 238: 1-2.

Vestergaard, B. 1984. Oxygen supply to the roots in different hydroponic systems. 6th International Congress on Soilless Culture. The Netherlands.

Yeh, N., J. Chung P., 2009. High-brightness LEDs –energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew Sust Energy Rev.* 13:2175–2180.

Yoon, C. G., and Choi, H. K. (2011). A study on the various light source radiation conditions and use of LED illumination for plant factory. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 25: 14-22.

Zheng, Y., Wang, L. and Dixon, M. 2007. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Hort*, 113: 162-165.

Anexo 1. Resultados obtenidos por los sensores durante 60 días del ciclo del cultivo.

Días después del trasplante	Fecha	Temperatura	Humedad (°C)	Temp Sol (°C)	pH	Ce
1	25/01/2021	19	92	14	5.96	1.20
2	26/01/2021	18	91	18	5.98	1.17
3	27/01/2021	18	93	16	5.99	1.16
4	28/01/2021	17	92	16.5	6.03	1.15
5	29/01/2021	18	91	17	6.00	1.50
6	30/01/2021	18	93	16	6.04	1.46
7	31/01/2021	17	92	17.25	6.62	1.45
8	01/02/2021	20	93	16.37	6.10	1.43
9	02/02/2021	22	91	16.15	6.14	1.42
10	03/02/2021	21	90	17.52	6.16	1.40
11	04/02/2021	22	91	17.62	6.28	1.40
12	05/02/2021	23	90	16.15	6.36	1.39
13	06/02/2021	23	92	18.78	6.41	1.37
14	07/02/2021	20	92	18.94	6.53	1.36
15	08/02/2021	21	91	19.38	6.10	1.58
16	09/02/2021	21	92	19.35	6.15	1.58
17	10/02/2021	21	94	19.56	6.22	1.56
18	11/02/2021	19	93	19.5	6.17	1.54
19	12/02/2021	21	95	19	6.12	1.54
20	13/02/2021	21	95	19.4	6.22	1.51
21	14/02/2021	19	75	18.94	6.36	1.46
22	15/02/2021	18	73	18.63	6.42	1.43
23	16/02/2021	19	75	19.21	6.51	1.41

Días después del trasplante	Fecha	Temperatura	Humedad (°C)	Temp Sol (°C)	pH	Ce
24	17/02/2021	19	91	16.52	5.63	1.40
25	18/02/2021	19	91	16.52	5.69	1.39
26	19/02/2021	21	85	17.32	5.89	1.38
27	20/02/2021	20	92	18.12	5.91	1.38
28	21/02/2021	16	93	17.21	5.99	1.36
29	22/02/2021	16	93	15	8.10	0.14
30	23/02/2021	19	93	16.69	6.16	1.80
31	24/02/2021	18	91	16.12	6.35	1.70
32	25/02/2021	21	93	17.16	6.40	1.65
33	26/02/2021	20	92	17.85	6.42	1.64
34	27/02/2021	22	94	18.81	6.49	1.64
35	28/02/2021	21	94	18.31	6.49	1.63
36	01/03/2021	22	95	18.87	6.50	1.63
37	02/03/2021	21	94	18.69	6.52	1.62
38	03/03/2021	21	95	19.12	6.02	1.61
39	04/03/2021	22	94	18.85	6.08	1.60
40	05/03/2021	20	92	18.56	6.11	1.59
41	06/03/2021	21	94	18.84	6.12	1.58
42	07/03/2021	21	94	18.72	6.19	1.58
43	08/03/2021	22	91	18.9	6.21	1.56
44	09/03/2021	21	93	19.04	6.23	1.56
45	10/03/2021	22	92	18.89	6.26	1.55
46	11/03/2021	22	93	18.94	6.28	1.54
47	12/03/2021	21	91	18.78	6.34	1.54
48	13/03/2021	20	90	18.81	6.41	1.52
49	14/03/2021	22	93	18.89	7.98	0.11
50	15/03/2021	21	92	16.51	6.01	2.01
51	16/03/2021	23	94	16.56	6.05	2.00
52	17/03/2021	23	93	16.71	6.09	2.00
53	18/03/2021	22	92	17.04	6.11	2.00
54	19/03/2021	19	95	17.12	6.14	1.99
55	20/03/2021	19	95	17.09	6.18	1.99
56	21/03/2021	20	91	17.21	5.63	1.97

Días después del trasplante	Fecha	Temperatura	Humedad (°C)	Temp Sol (°C)	pH	Ce
57	22/03/2021	22	92	17.22	6.64	1.94
58	23/03/2021	21	91	17.2	5.68	1.92
59	24/03/2021	23	92	27.28	5.70	1.9
60	25/03/2021	22	92	27.26	5.72	1.88

Anexo 2. Resultados del análisis de tejido foliar para el tratamiento 1 (NFT).

FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.		PAP Accredited		
				
Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010 Teléfono (461) 6145238 www.fertilab.com.mx		Certificados ante ISO 9001:2015		
ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL		FOLIO: PL-44318		
Cliente:	Jose Eduardo Desiderio Lorenzo	Cultivo:	Lechuga Invernadero	
Localización:	San Juan Acateno, Teziutlan, Puebla	Edad (DDS):	56	
Coordenadas:	1952 539, 9721.642	Organo de Muestreo:	Hoja	
Predio / ID:	N/A / Tratamiento NFT	Etaa Fenológica:	ND	
Emisión:	2021/03/31	Referencia:	ND	
Macronutrientes				
Elemento	Metodología	Resultado	Unidad	
Nitrógeno (N)	Dumas	5.41	%	
Nitratos (N-NO ₃)	Nitración con ácido Salicílico/espectrofotometría	NA	ppm	
Fósforo (P)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.78	%	
Potasio (K)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	7.78	%	
Calcio (Ca)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	1.41	%	
Magnesio (Mg)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.36	%	
Azufre (S)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.30	%	
Sodio (Na)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.13	%	
Cloro (Cl)	Titulación con Nitrato de Plata/Argentometría	NA	%	
Micronutrientes				
Elemento	Metodología	Resultado	Unidad	
Hierro (Fe)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	166	ppm	
Zinc (Zn)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	56.6	ppm	
Manganeso (Mn)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	235	ppm	
Cobre (Cu)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	8.45	ppm	
Boro (B)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	67.8	ppm	
Níquel (Ni)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.11	ppm	
Molibdeno (Mo)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.46	ppm	
Características Físicas				
Determinación	Peso Fresco	Peso Seco	Humedad	Arsénico (As)
Resultado	179	NA	NA	NA
Unidad	g	g	%	ppm

PND = Pendiente por verificación NA = No analizado ND = Sin datos


 Gerente del Área Analítica
 Ing. Agustín Ger Lira Olivarez

Los rangos de suficiencia nutricional utilizados en el presente reporte provienen de valores publicados en la literatura y debe utilizarse solo como referencia para evaluar el estado nutricional del cultivo, ya que no incluyen todas las variedades e híbridos que existen actualmente. Este documento se encuentra protegido y registrado ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial, queda prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización de FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.

Anexo 3. Resultados del análisis de tejido foliar para el tratamiento 2 (Raíz flotante).



FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010
 Teléfono (461) 6145238
 www.fertilab.com.mx



Certificados ante ISO 9001:2015

ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL **FOLIO: PL-44319**

Cliente:	Jose Eduardo Desidero Lorenzo	Cultivo:	Lechuga Invernadero
Localización:	San Juan Acateno, Teziutlan, Puebla	Edad (DDS):	56
Coordenadas:	1952 539, 9721 642	Organo de Muestreo:	Hoja
Predio / ID:	ND / Raíz Flotante	Etapas Fenológica:	ND
Emisión:	2021/03/31	Referencia:	ND

Macronutrientes

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Nitrógeno (N)	Dumas	5.47	%
Nitratos (N-NO ₃)	Nitración con ácido Salicílico/espectrofotometría	NA	ppm
Fósforo (P)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.80	%
Potasio (K)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	7.81	%
Calcio (Ca)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	1.23	%
Magnesio (Mg)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.24	%
Azufre (S)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.29	%
Sodio (Na)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.08	%
Cloro (Cl)	Titulación con Nitrato de Plata/Argentometría	NA	%

Micronutrientes

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Hierro (Fe)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	155	ppm
Zinc (Zn)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	63.3	ppm
Manganeso (Mn)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	212	ppm
Cobre (Cu)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	17.4	ppm
Boro (B)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	66.0	ppm
Níquel (Ni)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.16	ppm
Molibdeno (Mo)	Digestión acida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.36	ppm

Características Físicas

Determinación	Peso Fresco	Peso Seco	Humedad	Arsénico (As)
Resultado	187	NA	NA	NA
Unidad	g	g	%	ppm

PND = Pendiente por verificación NA = No analizado ND = Sin datos

Gerente del Área Analítica
 Ing. Agustín Ger Cis Olivarez

Los rangos de suficiencia nutricional utilizados en el presente reporte provienen de valores publicados en la literatura y debe utilizarse solo como referencia para evaluar el estado nutricional del cultivo, ya que no incluyen todas las variedades e híbridos que existen actualmente. Este documento se encuentra protegido y registrado ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial, queda prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización de FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.

Anexo 4. Resultados del análisis de tejido foliar para el tratamiento 3 (Raíz flotante).



FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010
 Teléfono (461) 6145238
 www.fertilab.com.mx



Certificados ante ISO 9001:2015

ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL **FOLIO: PL-44320**

Cliente:	Jose Eduardo Desiderio Lorenzo	Cultivo:	Lechuga Invernadero
Localización:	San Juan Acateno, Teziutlan, Puebla	Edad (DDS):	56 DIAS
Coordenadas:	1952.539, 9721.642	Organo de Muestreo:	Hoja
Predio / ID:	N/A / Tratamiento Aeroponia	Etaa Fenológica:	ND
Emisión:	2021/03/31	Referencia:	ND

Macronutrimientos			
Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Nitrógeno (N)	Dumas	5.05	%
Nitratos (N-NO ₃)	Nitración con ácido Salicílico/espectrofotometría	NA	ppm
Fósforo (P)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.69	%
Potasio (K)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	5.95	%
Calcio (Ca)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	1.11	%
Magnesio (Mg)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.31	%
Azufre (S)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.29	%
Sodio (Na)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.12	%
Cloro (Cl)	Titulación con Nitrato de Plata/Argentometría	NA	%

Micronutrimientos			
Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Hierro (Fe)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	87.1	ppm
Zinc (Zn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	45.2	ppm
Manganeso (Mn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	184	ppm
Cobre (Cu)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	8.07	ppm
Boro (B)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	42.1	ppm
Níquel (Ni)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.24	ppm
Molibdeno (Mo)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.13	ppm

Características Físicas				
Determinación	Peso Fresco	Peso Seco	Humedad	Arsénico (As)
Resultado	190	NA	NA	NA
Unidad	g	g	%	ppm

PND = Pendiente por verificación NA = No analizado ND = Sin datos

Gerente del Área Analítica
 Ing. Agustín Ger Lía Olivarez

Los rangos de suficiencia nutricional utilizados en el presente reporte provienen de valores publicados en la literatura y debe utilizarse solo como referencia para evaluar el estado nutricional del cultivo, ya que no incluyen todas las variedades e híbridos que existen actualmente. Este documento se encuentra protegido y registrado ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial, queda prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización de FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.

Anexo 5. Resultados de las variables morfológicas para los tres tratamientos.

Tratamiento	PPF	PFR	PFT	PSP	PSR	PST	NH	AP	RT	LT	LR
1	235	12.1	247.1	13.73	2.4	16.15	24	29.5	1.5	3.5	24
1	159.9	15.62	175.52	9.75	3.1	12.88	19	26.5	1	1.5	23
1	174.7	18.13	192.83	10.71	3.6	14.34	19	28	1.3	3	42
1	208.1	10.5	218.6	12.14	2.1	14.24	26	28.5	1.8	2	25
1	229.7	13.89	243.59	13.53	2.8	16.31	21	24	1.6	1.8	34
1	255.4	18.2	273.6	15.20	3.6	18.84	22	26	1.4	1.7	29
1	167	18.4	185.4	10.30	3.7	13.98	15	27	1.3	2.2	28
1	240	22.6	262.6	14.59	4.5	19.11	24	28.5	1.9	2.1	45
2	147.2	10.7	157.9	8.77	2.1	10.91	26	24	1.4	2.1	45
2	163	18.1	181.1	10.06	3.6	13.68	23	23.5	1.2	1	50.5
2	198	22.2	220.2	12.23	4.4	16.67	28	27	1.6	1.1	46
2	293	31.3	324.3	18.02	6.3	24.28	36	32	1.6	2	55.2
2	265	18.6	283.6	15.76	3.7	19.48	28	29	1.4	2.1	49
2	227.6	31	258.6	14.37	6.2	20.57	34	29	1.2	2	29.7
2	153	36	189	10.50	7.2	17.70	26	24.6	1.1	1.8	27
2	159	31	190	10.56	6.2	16.76	24	27	1.3	2	34
3	103.8	4.7	108.5	6.03	0.9	6.97	13	24	1	3	56
3	129	17.7	146.7	8.15	3.5	11.69	14	25	1.2	3.5	60
3	86.5	13.2	99.7	5.54	2.6	8.18	12	22	0.5	2.8	61
3	104	12.1	116.1	6.45	2.4	8.87	15	23	0.8	2.5	61
3	83.2	14.9	98.1	5.45	3.0	8.43	13	20	1.1	2.8	52
3	77.4	23.6	101	5.61	4.7	10.33	12	22.1	0.8	4	54
3	82.9	6.9	89.8	4.99	1.4	6.37	17	18	1.2	2	56
3	89	10.3	99.3	5.52	2.1	7.58	15	21	1.1	3	49

SOBRE OS AUTORES

Guillermo Jesuita Pérez Marroquín: Ingeniero Agrónomo en Irrigación, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Maestro en Ciencias en Irrigación, Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila.

José Eduardo Desiderio Lorenzo: Ingeniero Agrohídrico, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Fabian Enriquez García: Ingeniero Agrónomo en Economía Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Maestro en Ciencias en Planeación Agropecuaria UAAAN. Doctor en Ciencias en Educación Agrícola Superior, Universidad Autónoma Chapingo.

Fabiel Vázquez Cruz: Ingeniero Agrónomo en Irrigación, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Maestro en Ciencias en Irrigación, Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila.

Raúl Berdeja Arbeu: Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Maestro en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo. Doctorado en Fruticultura, Colegio de Posgraduados.

Ramiro Escobar Hernández: ingeniero agrónomo zootecnista, tecnológico de Úrsulo Galván Veracruz. Maestría en agroforestería para el desarrollo de América y el caribe, Universidad Autónoma de Chapingo.

Sigfrido David Morales Fernández: Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Maestro en Ciencias en Genética, Colegio de Posgraduados. Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.