



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE NITRÓGENO EN LECHUGAS HIDROPÓNICAS

TESIS DE GRADO
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

PRESENTA:
CARLOS ENRIQUE ALVAREZ MORENO

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: AGUSTÍN RUIZ GARCÍA



Chapingo, Estado De México, diciembre de 2019.

**MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE NITRÓGENO EN
LECHUGAS HIDROPÓNICAS**

Tesis realizada por **Carlos Enrique Alvarez Moreno** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

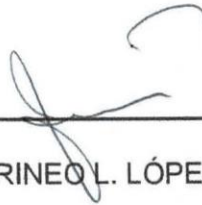
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



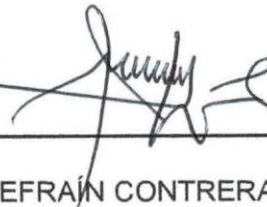
DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

ASESOR:



DR. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ

ASESOR:



DR. EFRAÍN CONTRERAS MAGAÑA

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
DEDICATORIAS	ix
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	2
1.1 Referencias	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA	12
2.1 Agricultura protegida	12
2.2 Cultivo sin suelo	13
2.2.1 Solución nutritiva	15
2.3 Cultivo de lechuga	16
2.3.1 Acumulación de nitratos	18
2.4 Factores ambientales que favorecen el cultivo de lechuga	19
2.4.1 Temperatura	19
2.4.2 Humedad relativa	20
2.4.3 Energía Radiante	20
2.4.4 pH	20
2.4.5 Conductividad eléctrica	21
2.5 Sistema de balsas flotantes	21
2.6 Sistema de monitoreo	22
2.6.1 Microcontrolador	24
2.6.2 Módulos	25
2.6.3 Sensores	26
2.6.3.1 Sensor de temperatura y humedad relativa	26
2.6.3.2 Sensor de temperatura del cultivo	27

2.6.3.3	Sensor de conductividad eléctrica	27
2.6.3.4	Sensor de pH.....	28
2.6.3.5	Sensor de radiación PAR	28
2.7	Modelación.....	29
2.7.1	Modelos del crecimiento de lechuga.....	30
2.8	Referencias	32
3	Sistema de monitoreo de variables ambientales para un cultivo de lechugas en balsas flotantes.	38
3.1	Resumen.....	38
3.2	Introducción	39
3.3	Materiales y métodos	42
3.4	Discusión y resultados	54
3.5	Conclusiones.....	62
3.6	Recomendaciones	63
3.7	Referencias.....	63
4	Sensibilidad global y calibración de un modelo dinámico de crecimiento y absorción de nitrógeno para lechuga.....	66
4.1	Resumen.....	66
4.2	Introducción	69
4.3	Materiales y métodos	71
4.3.1	Descripción del experimento.....	71
4.3.2	Colección de datos	73
4.3.3	Descripción del modelo. Modelo para crecimiento y acumulación de Nitrógeno	76
4.3.4	Método de Sobol de análisis de sensibilidad global.....	79
4.3.5	Calibración del modelo	81
4.4	Resultados y discusión	82
4.5	Conclusiones.....	84
4.6	Referencias.....	85

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO DOS

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de la producción bajo invernadero.....	13
Cuadro 2. Requerimiento nutricional utilizado para el cultivo de lechuga en sistemas hidropónicos suministrado por una solución nutritiva.....	15
Cuadro 3. Análisis de elementos nutrimentales en diversos tipos de lechuga comercial por cada 100 gramos de peso fresco.....	17
Cuadro 4. Niveles máximos de NO_3^- establecidos por el reglamento N° 1258/2011.....	19
Cuadro 5. Esquemas de uso del agua en lechuga en diferentes sistemas de cultivo hidropónico.....	22
Cuadro 6. Características del Arduino Mega 2560.....	25

CAPÍTULO TRES

Cuadro 1. Características de los sensores y componentes utilizados en el sistema de monitoreo para un cultivo de lechugas en hidroponía	44
---	----

CAPÍTULO CUATRO

Cuadro 1. Parámetros del modelo de lechugas como factores de entrada para el análisis de sensibilidad global basado en el cálculo de las varianzas	78
Cuadro 2. Sensibilidad de los parámetros en la absorción de nitrógeno y acumulación de materia seca. Método Sobol JANSSEN, con 50% de variación del valor de los parámetros, N = 4000. Hipercubo latino, ode23s	83
Cuadro 3. Parámetros estimados con LSQNONLIN del modelo de absorción de nitrógeno y acumulación de biomasa.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO TRES

Figura 1.	Diagrama general del sistema de monitoreo de variables ambientales	45
Figura 2.	Subsistemas que componen el prototipo de monitoreo.....	47
Figura 3.	Conexión de los componentes que integran el sistema en el microcontrolador.....	48
Figura 4.	Programación de los sistemas integrados en el monitoreo de las variables ambientales	52
Figura 5.	Distribución del sistema de monitoreo de variables ambientales en el sistema de producción de balsas flotantes.....	54
Figura 6.	Sistema de monitoreo de variables ambientales distribuido en el cultivo de prueba	55
Figura 7.	Datos obtenidos de la temperatura ambiente del invernadero en el sistema de producción de lechuga hidropónica.....	56
Figura 8.	Datos obtenidos de la temperatura de la hoja de la planta en el sistema de producción.....	57
Figura 9.	Datos de la radiación PAR obtenida durante la producción de lechuga hidropónica en el invernadero.....	58
Figura 10.	Datos obtenidos de la conductividad eléctrica en el sistema de producción de lechuga hidropónica dentro del invernadero.....	59
Figura 11.	Datos obtenidos de la temperatura de la solución nutritiva en el sistema de producción de lechuga hidropónica dentro del invernadero.....	58
Figura 12.	Valores de pH obtenidos en la solución nutritiva del sistema de producción de lechuga hidropónica.....	60
Figura 13.	Medición de la variable pH en la solución nutritiva del sistema de producción de lechuga hidropónica.....	61
Figura 14.	Crecimiento de la lechuga tipo Mantequilla en las diferentes etapas de muestreo.....	61
Figura 15.	Producción de lechuga hidropónica en un sistema de balsas flotantes en etapa de maduración.....	62

CAPÍTULO CUATRO

Figura 1.	Plántula de lechuga desarrollada en el sustrato de lana de roca; distribución de plántulas por marco real en el sistema de producción hidropónico	72
Figura 2.	Estructura para la captura de imágenes para el procesamiento del área de cobertura de la lechuga	74
Figura 3.	Procesamiento de imágenes para obtener el porcentaje y área de cobertura de la lechuga.....	75
Figura 4.	Medición de área foliar de la planta de lechuga en el equipo LI-COR modelo LI-3100.....	76
Figura 5.	Grafica de absorción de nitrógeno y acumulación de materia seca con respecto al tiempo del ciclo de producción de la lechuga con valores nominales.....	82
Figura 6.	Calibración de los parámetros en absorción de nitrógeno y acumulación de materia seca con Lsqnonlin en la lechuga variedad mantequilla.....	84

DEDICATORIAS

*A mi madre, Norma Guadalupe Moreno Valdés,
por su gran esfuerzo, sacrificio y confianza, por guiarme en el camino de
la superación, por enseñarme a luchar por mis sueños y hacer de mí una
persona útil en la sociedad, por su gran cariño y apoyo en cada decisión
de mi vida.*

*A mis hermanos, Josué Trinidad y Dulce María,
por brindarme su apoyo incondicional, respaldarme en decisiones de
vida y estar siempre al pendiente de mí.*

*A mi sobrina Danahe,
por llegar en un momento importante, alegrando cada día de nuestras
vidas.*

*A Monserrat Herrera,
por ser una persona especial en mi vida, por demostrarme su cariño y
brindarme su apoyo en todo momento, por ser una excelente persona y
tener ese destello de motivación para crecer juntos.*

*A mi gran amigo Bonifacio Gaona,
por su amistad brindada, por ser un ejemplo a seguir, por su apoyo
brindado en mi paso como estudiante y motivación para seguir con mis
estudios de posgrado.*

*A mis amigos y compañeros, en especial a:
Jesús Antonio, Gamaliel, David Cano y Raúl por su apoyo, por su alegre
compañía, por su amistad y momentos inolvidables a lo largo de
nuestros estudios.*

Muchas Gracias

Carlos Enrique

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para poder desarrollar mis estudios de posgrado y haber concluido de manera satisfactoria.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo económico para la culminación del proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al Departamento de Irrigación, por brindarme un espacio para poder realizar la etapa experimental del proyecto.

Al Dr. Agustín Ruiz García por ser mi director de investigación y confiar plenamente en mí para desarrollar el trabajo de investigación, por gestionar espacios y materiales para el desarrollo del proyecto, agradezco su experiencia y conocimientos compartidos, por otorgarme su apoyo, su valioso tiempo invertido y su paciencia brindada.

Al Dr. Irineo López Cruz por pertenecer a mi comité asesor y compartir herramientas para poder desarrollar el proyecto de investigación.

Al Dr. Efraín Contreras Magaña por ser parte de mi comité asesor, por aportar su dedicación y experiencia a este proyecto de investigación, por sus excelentes cursos que me motivaron a desarrollar investigación sobre el tema y por gestionar espacios para poder realizar el análisis de resultados.

A mi familia por brindarme confianza para seguir adelante, por su apoyo incondicional.

A los laboratoristas y a todas las personas que estuvieron relacionadas en el proyecto de investigación, que siempre estuvieron dispuestas a ayudarme y que hicieron esto posible.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor del presente trabajo, Carlos Enrique Álvarez Moreno originario de la comunidad de San Francisco Chejé, Jocotitlán, Estado de México, México nació el 25 de octubre de 1993. Realizó sus estudios de primaria en la escuela “Licenciado Benito Juárez”, ubicada en el centro de la comunidad de Chejé. Curso sus estudios de secundaria en la escuela oficial #311 “Leonardo Bravo” en la misma comunidad.

En el 2008 ingresa a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), donde culminó exitosamente sus estudios de nivel medio superior. Del 2012 al 2016 cursa la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola en la misma Universidad. En el 2016 obtiene el título por mérito académico de Ingeniero Mecánico Agrícola.

En agosto de 2017 ingresa al posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la UACH, y durante el periodo de maestría desarrolla los siguientes trabajos: 1) Sistema de monitoreo de variables ambientales para un cultivo de lechugas en balsas flotantes, 2) Sensibilidad global y calibración de un modelo dinámico de crecimiento y absorción de nitrógeno para lechuga.

A finales del 2019 presenta el presente trabajo “Modelación del crecimiento y acumulación de nitrógeno en lechugas hidropónicas” para obtener el grado de Maestro en Ingeniería.

RESUMEN GENERAL

MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE NITRÓGENO EN LECHUGAS HIDROPÓNICAS¹

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza de hoja con gran importancia económica en México. La producción ha ido en aumento al asociarlo con sistemas hidropónicos; sin embargo, los altos niveles de nitratos (NO_3^-) interfieren en la calidad del producto, ocasionando daños a la salud del consumidor. Hoy en día, el desarrollo de modelos matemáticos permite predecir la cantidad de nitrógeno acumulado durante el crecimiento de lechugas, considerando la especie, la fertilización, la época y ambiente del cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la acumulación de biomasa y contenido de nitrógeno de lechugas producidas en un sistema hidropónico, a través un modelo dinámico mecanicista, en Chapingo, México. La investigación se realizó en dos etapas, primero se diseñó, construyó y evaluó un sistema de monitoreo de variables ambientales basado en la plataforma Arduino, que se colocó en el sistema de balsas flotantes. La segunda etapa programó el modelo de crecimiento y acumulación de nitrógeno de la lechuga mediante el ambiente de programación Simulink-Matlab, comparándolo con los datos experimentales medidos durante el mes de septiembre de 2019. Se estimaron 5 parámetros (J_{max_0} , α , Θ , σ , μ_{max}) relacionados con la absorción de nitrógeno y acumulación de biomasa en el modelo, obteniendo de la calibración RMSE 1.3892 y 1.0645 ; una eficiencia de 0.9558 0.8608 para N_{up} y w respectivamente, simulando de manera razonable la acumulación de nitrógeno y biomasa en condiciones limitadas de nitrógeno.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., hidroponía, modelos, nitratos, Arduino.

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.
Autor: Álvarez-Moreno Carlos Enrique.
Director de Tesis: Ruiz-García Agustín.

GENERAL ABSTRACT

MODELING OF THE GROWTH AND ACCUMULATION OF NITROGEN IN HYDROPONIC LETTUCES.²

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is a leafy vegetable of a big economic importance in Mexico. The production has increased since associating them with hydroponic systems; however, high levels of nitrates (NO_3^-) interfere with the quality of the product damaging consumer's health. Nowadays, the mathematical models development allows to predict the quantity of nitrogen accumulated during the growth of lettuces considering the species, fertilization, season and ambience of the cultivation. The objective of this work was to evaluate the accumulation of biomass and nitrogen content of lettuces produced in a hydroponic system through a dynamic mechanistic model, in Chapingo, Mexico. The research was performed in two stages, first a system for monitoring environmental variables based on the Arduino platform, which was placed in the floating raft system was designed, built and evaluated. The second stage, the growth model and accumulation of nitrogen of the lettuce by means of the ambience of programming Simulink-Matlab, comparing it with the experimental information measured during september, 2019 was programmed. Five parameters (J_{max_0} , α , Θ , σ , μ_{max}) related to nitrogen absorption and biomass accumulation in the model, obtaining from the RMSE calibration 1.3892 and 1.0645; efficiency of 0.9558 0.8608 for Nup and w respectively, it reasonably simulates nitrogen accumulation and biomass under limited nitrogen conditions.

Key words: *Lactuca sativa* L., hydroponics, models, nitrates, Arduino.

² Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Alvarez-Moreno Carlos Enrique
Advisor: Ruiz-García Agustín

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Ante la creciente necesidad de alimentos en el mundo para satisfacer la demanda de la población, la producción de cultivos en el transcurso del tiempo sufre cambios drásticos, siendo necesario implementar producciones en un entorno reducido, que es donde la agricultura ha tomado una importante dirección a diferentes sistemas y modalidades de producción (Velásquez et al., 2014).

Antes en México, la agricultura era considerada una actividad que no demostraba una economía significativa por un bajo rendimiento de producción que conducía al déficit de alimentos a la población, sin embargo, las necesidades de suministros asociada con las técnicas de producción han ido incrementando, induciendo a la agricultura como una actividad rentable para invertir como negocio (Licea, 2012; Macías, 2010). México está bien ubicado para la actividad agrícola, tiene las condiciones que hacen pensar en la posibilidad de una agricultura próspera, pero desde una perspectiva de agricultura extensiva convencional no es así, por las condiciones en las que se encuentra el territorio evitando crecer en este sector de manera sustentable (Sánchez y Moreno, 2017).

Los invernaderos son una tecnología que beneficia el desarrollo de las plantas, basándose en una cubierta de materiales traslucidos favoreciendo la posibilidad de controlar el ambiente, con la finalidad de incrementar los rendimientos de los cultivos (Coronado, 2016). En México se encuentran 25,814 unidades de producción en condiciones de agricultura protegida, de las cuales 65% son invernaderos, 10% son macro túneles, 10% micro túneles y 15% son casa sombra (SIAP, 2016). Las condiciones climáticas en un invernadero son primordiales satisfaciendo un ambiente óptimo para el crecimiento y de las plantas, ya que condicionan los procesos fisiológicos de respiración, transpiración y fotosíntesis.

La producción de plántulas en invernadero es eficiente considerando las condiciones climáticas óptimas para lograr un alto rendimiento a bajo costo, buena calidad y bajo impacto ambiental (Rosales, 2017).

Los cultivos producidos en los invernaderos por lo general suelen utilizar sistemas de producción hidropónicas que surge como sistema alternativo que no requiere suelo, y además limita las condiciones meteorológicas con el ambiente interno, permitiendo considerablemente reducir costos de producción, además de cosechas fuera de estación, elevados rendimientos y alta calidad; el suministro de nutrientes se realiza a través de una solución nutritiva (Sánchez y Escalante, 1988; Montalvo, 2015). La producción de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es corresponde a la principal hortaliza cultivada en ambientes protegidos, y esta situación ha enfrentado problemas en el mercado por saturación y como consecuencia el bajo costo del producto, para ello, se han incrementado técnicas para sustituir el producto por otras especies cultivadas en invernadero, siendo una opción la lechuga en sistemas hidropónicos (Moreno, *et al.*, 2015).

La lechuga representa un cultivo económicamente viable y que asociado con la hidroponía da como resultado una alternativa de producción que permite la captación de recursos económicos, se cultiva principalmente para el consumo de su hoja y por su fácil manejo su producción ha ido en aumento (Gutiérrez, 2011; Zambrano, 2014). Varias investigaciones han señalado que, para producir lechuga, se utiliza principalmente el sistema de balsas flotantes obteniendo mayor producción y sobretodo un ahorro significativo en agua y fertilizantes (Licea, 2012).

Licea (2012) realizó la comparación en el rendimiento de lechuga sobre el efecto de la solución nutritiva en algunos sistemas hidropónicos: balsa flotantes y el sistema aeropónico, obteniendo que en una producción de lechuga utilizando el sistema aeropónico resulta un menor peso y disminución de la calidad comparado con el sistema de producción de balsas flotantes.

Moreno *et al.*, (2015) desarrollo una producción de lechuga en invernadero implementando tres sistemas hidropónicos: sustrato con recirculación de solución nutritiva, otra sin recirculación y un sistema de balsas flotantes; obteniendo que el sistema de balsas flotantes establece un rápido crecimiento y un eficiente uso del recurso hídrico y de nutrientes en comparación a sistemas de sustrato sólido.

Coronado (2016) realizó una investigación considerando sistemas de producción hidropónica de lechuga: en el sistema de sustrato sólido, sistema NFT y sistema de balsas flotantes. Evaluó algunos efectos positivos al implementar distintas concentraciones de silicio en los sistemas hidropónicos. Encontraron que el sistema de raíz flotante en comparación con el NFT, bajo las mismas condiciones nutricionales presenta mayor longitud en la hoja, y ambas presentan la misma acumulación de materia fresca con respecto al sistema de sustrato sólido.

El crecimiento y desarrollo óptimo de los cultivos está relacionado con el suministro de nutrientes, siendo el nitrógeno uno de los principales elementos (Chowdhury y Das, 2015). La forma de aprovechamiento del nitrógeno para las plantas se da a través de nitrato (NO_3^-), en donde la lechuga es el cultivo de hoja que más acumula, variando entre genotipos, estación del cultivo y el uso de fertilizantes (Lara et al., 2019). El (NO_3^-) en altas concentraciones, provoca complicaciones en la salud, resultando toxico su consumo, ya que, al transformar el nitrato a nitrito y una combinación de N-nitroso, resultan componentes cancerígenos (Comisión Europea, 2011). La norma mundial de la salud (Comisión Europea, 2011) indica que los niveles de (NO_3^-) influyen en seguridad alimentaria, inocuidad y sobre todo en la calidad del producto. En la actualidad, es común el desarrollo de modelos matemáticos que, la agricultura, ha tenido relevancia por la investigación y conocimiento de los sistemas, permitiendo evaluar diversas prácticas para manejar cultivos, evitando elaborar experimentos de alto costo (López, 2003). En la horticultura, los modelos matemáticos son utilizados generalmente para optimizar la producción, pero se han propuesto diversos modelos que tratan de controlar las condiciones climáticas dentro de un invernadero y el sistema radicular de las plantas (Gary, 1999). En el cultivo de lechuga se han desarrollado diversas investigaciones por su fácil manejo y por lo tanto más fáciles de analizar (López et al., 2004). Diversos modelos matemáticos han sido implementados para modelar el crecimiento de las lechugas (López et al., 2005).

Sweeney *et al.* (1981) desarrollaron un modelo para lechugas, considerando la materia seca estructural y no estructural (ignorando la materia seca de raíz) como variables de estado; la variable de entrada está dada por la radiación y la temperatura y variables de salida son la materia seca y área foliar. El modelo de Sweeney, se validó con datos obtenidos de una experimentación en Inglaterra, que obtuvo como resultado una predicción puntual de la producción de biomasa del cultivo (López *et al.*, 2005).

Henten (1994a) y Henten (1994b) desarrollo un modelo para lechugas, el cual establece como variables de estado el peso seco estructural y no estructural, obteniendo la suma de los dos pesos como el total. El peso seco no estructural está representado por el contenido de carbohidratos y almidón; y el peso seco estructural representa los componentes totales del peso seco de la planta restando el contenido del peso seco no estructural (López *et al.*, 2005).

Seginer *et al.* (1998) propusieron el modelo del cultivo de lechugas NICOLET (Nitrate Control in Lettuce) que consta de dos variables de estado: el contenido de carbono estructural y no estructural. Como variables de salida se encuentra el peso seco y peso fresco de la planta, además del contenido de nitrato (López *et al.*, 2005).

Zhang *et al.* (2008) describe un modelo para obtener la cantidad de nitrógeno y acumulación de materia seca en la lechuga que se produce bajo invernadero, el cual se constituye de tres sub modelos relacionados: fotosíntesis, materia seca estructural y no estructural y absorción de nitrógeno. El uso del modelo predice la evolución de la demanda de nitrógeno en la lechuga durante su crecimiento.

Las variables de entrada de un modelo para llevar acabo la simulación regularmente corresponden a las variables ambientales obtenidas en el cultivo empleado, para la adquisicion de datos es necesario colocar instrumentación que mida y colecte los datos (Juárez, 2010). En México, el alto costo de inversión para la adaptación de un sistema de monitoreo ambiental en invernadero, representa una tecnología que en ocasiones el productor lo omite y eso repercute

en el rendimiento y calidad del producto (Lugo *et al.*, 2013). Actualmente, todos están plenamente convencidos en mejorar los medios técnicos, con el fin de controlar con más eficacia las condiciones de la producción, a fin de que el cultivo produzca, en condiciones más favorables (Roca y Florian, 2007). Para aumentar la producción de un cultivo es necesario optimizar la tecnología aplicada con técnicas de control dentro de un invernadero (Ponce *et al.*, 2017). Los avances en la tecnología de los sensores, actuadores, y microcontroladores, son cada vez más eficaces, fiables y baratos, favoreciendo a la horticultura (Roca y Florian, 2007) y que, debido a su fácil adquisición, existe la posibilidad de aumentar la efectividad de los invernaderos (Groener *et al.*, 2015).

Conocer las condiciones ambientales de un cultivo permite un control de sus requerimientos y necesidades, evitando estrés en la planta, y medir con dispositivos de forma manual en el campo puede resultar una actividad laboriosa y consumir mucho tiempo. Para ello, la instalación de un dispositivo de monitoreo electrónico puede permitir un funcionamiento continuo y desatendido, garantizando un registro completo y preciso de las variables (Fisher, 2007).

Con lo mencionado, el objetivo de la investigación fue modelar la acumulación de biomasa y contenido de nitrógeno en lechugas hidropónicas mediante un modelo dinámico mecanicista, así como realizar el análisis de sensibilidad global y estimación de parámetros. Otro objetivo fue desarrollar y evaluar un sistema de monitoreo de variables ambientales para producir lechugas hidropónicas. El presente trabajo está conformado por cuatro capítulos: iniciando con una introducción general, una revisión de literatura, un artículo científico enviado para su publicación en una revista científica y el desarrollo de un artículo para su revisión. El capítulo uno corresponde a la introducción general del proyecto en donde se abarcan diversos puntos para implementar el desarrollo de la investigación como la justificación, la importancia de estudio y métodos para la solución del problema principal. El capítulo dos corresponde a una revisión de literatura, el cual abarca ideas y conceptos que ayuden a complementar lo mencionado en los artículos científicos. El tercer capítulo corresponde al

“Sistema de monitoreo de variables ambientales para la producción de lechugas hidropónicas”, en donde se presenta el desarrollo, construcción y prueba de un dispositivo electrónico capaz de asociar instrumentos de medición y módulos para la adquisición de variables ambientales, el cual se implementó en un cultivo de lechugas hidropónicas en balsas flotantes, evaluando su funcionalidad y precisión de datos medidos. El cuarto capítulo corresponde a “Sensibilidad global y calibración de un modelo dinámico de crecimiento y absorción de nitrógeno para lechuga”, que simula la acumulación de biomasa y concentración de nitrógeno de la lechuga hidropónica en balsas flotantes, así como el desarrollo del análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más influyentes durante la producción de lechuga.

1.1 Referencias

- Comisión Europea (2011). Reglamento (UE) N° 1258/2011 DE LA COMISIÓN EUROPEA. *Diario Oficial de la Unión Europea*. 8 (12), 1-5. doi: 10.2903/j.efsa.2010.1935.
- Chowdhury, A., y Das, A. (2015). Nitrate accumulation and vegetable quality. *International Journal of Science and Research*. 4(2), 1668-1672.
- Coronado, A. (2016). *Uso de silicio en lechuga (Lactuca Sativa) en sistema NFT y raiz flotante*. (Tesis de pregrado). Agronomía en Horticultura Protegida, Universidad Autónoma Chapingo. México. .
- Fisher, D. K. (2007). Automated collection of soil-moisture data with a low-cost microcontroller circuit. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 23 (4), 493-500.
- Gary, C. (1999). Modeling greenhouse crops: state of the art and perspectives. *Acta Horticultura*. 495 (19), 317-322.
- Groener, B., Knopp, N., Korgan, K., Perry, R., Romero, J., Smith, K., Stainback, A., Strzelczyk, A., y Henriques, J. (2015). Preliminary design of a Low-Cost greenhouse with open source control systems. *Procedia Engineering*. 107 (15), 470-479. doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.105
- Gutierrez, J. (2011). *Producción de lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva*. (Tesis de maestría). Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Van Henten, E. J. (1994a). *Greenhouse climate management: an optimal control approach*. (Tesis doctoral). Agricultural, Wageningen Agricultural University. The Netherlands.

- Van Henten, E. J. (1994b). Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. *Agricultural System*. 45 (1), 55-72. doi: 10.1016/S0308-521X(94)90280-1
- Juárez, A. (2010). *Validación del modelo matemático de crecimiento Nicolet b3 para el cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero*. (Tesis de maestría). Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Antonio Narro. México.
- Lara, A., Rojas, A., Romero, M., Ramirez, H., Crespo, E., Alcalá, J., y Loredó, C. (2019). Growth and NO₃- accumulation in hydroponic lettuce with nitrate/ammonium ratios in two cultivation season. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 42 (3), 21-29.
- Licea, I. (2012). (2012). *Efecto de la solución nutritiva en el rendimiento de lechuga en dos sistemas hidropónicos: camas flotantes y aeropónica*. Universidad Autónoma de Querétaro. (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- López Cruz, I. L., Van Willigenburg, L. G., y Van Straten, G. (2003). Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: Differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 40(3), 179-197. doi: 10.1016/S0168-1699(03)00019-X
- López, I., Ramirez, A., y Rojano, A. (2004). Sensitivity analysis of a dynamic growth model for greenhouse. *Agrociencia*. 38 (6), 613-624.
- López, I., Ramirez, A., y Rojano, A. (2005). Modelos Matemáticos De Hortalizas En Invernadero: Trascendiendo La Contemplación De La Dinámica De Cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 11 (2), 257-267. doi: 10.5154/r.rchsh.2003.08.050

- Lugo, O., Villavicencio, G., y Díaz, S. (2013). Paquete tecnológico para el monitoreo ambiental en invernaderos con el uso de hardware y software libre. *Terra Latinoamericana*. 32 (1), 77-84.
- Macias, M. (2010). Competitividad de México en el mercado de frutas y hortalizas de Estados Unidos de América. *Agroalimentaria*. 16 (31), 31-38.
- Montalvo, J. R. (2015). Sistema Hidropónico en balsa Flotante. *Infoagronomo*.
Revisado: 27 Octubre 2018. Recuperado de:
<http://infoagronomo.com/nota.php?nota=1133&seccion=1>
- Moreno, E., Sánchez, F., Gutiérrez, J., González, L., y Pineda, J. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 21 (1), 43-55. doi: 10.5154/r.rchsh.2013.12.047
- Ponce, P., Molina, A., y Mata, O. (2017). Controladores inteligentes para invernadero hidropónico. *Research in computing science*. 135 (1), 99-114.
- Roca, D., y Florian, P. (2007). *Un nuevo sistema de gestión integral automática de cultivos en invernaderos hidropónicos*. In Vida Rural. Vol. 1, pp. 40-42.
- Rosales, J. (2017). *Monitoreo y control climático de un invernadero a escala*. (Informe). Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Sánchez, F., y Escalante, R. (1988) . *Hidroponía*. pp. 194. Chapingo, México. UACH. Tercera edición.
- Sánchez, F., y Moreno, E. (2017) . *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. pp. 397. Chapingo, México. UACH. Primera edición.

- Seginer, I., Buwalda, F., y Straten, G. (1998). Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Horticultura*. 456 (1), 187-197.
- SIAP (2016). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Agricultura. Revisado: febrero 2018. Recuperado de: <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura.aspx>
- Sweeney, D., Hand, D., Slack, G., y Thornley, J. (1981). Modelling the growth of winter lettuce. *Academic Press*. , 217-229.
- Velásquez, P., Ruíz, H., Chaves, G., y Luna, C. (2014). Productividad de lechuga (*lactuca sativa*) en condiciones de macrotúnel en suelo vitric haplustands. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 31 (2), 93-105. doi: 10.22267/rcia.143102.34
- Zambrano, A. (2014). *Estudio comparativo de tres genotipos de lechuga cultivadas en tres sistemas de producción hidropónica*. (Tesis de pregrado). Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Guayaquil. Ecuador. .
- Zhang, K., Burns, I., y Turner, M. (2008). Derivation of a Dynamic Model of the Kinetics of Nitrogen Uptake Throughout the Growth of Lettuce : Calibration and Validation Derivation of a Dynamic Model of the Kinetics of Nitrogen Uptake Throughout the Growth of Lettuce : Calibration and Validation A. *Journal of Plant Nutrition*. 31 (1), 1440-1460. doi: 10.1080/01904160802208345

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Agricultura protegida

La agricultura protegida está definida como un conjunto de técnicas o mejoras en el sistema de producción de un cultivo que tiene como objetivo el manejo de las condiciones ambientales para obtener un crecimiento y desarrollo adecuado de un cultivo y poder alcanzar mayores rendimientos y evitar riesgo de pérdida (Rodríguez *et al.*, 2013).

El uso de invernaderos para la producción agrícola, es una nueva técnica para la mejora de rendimientos, por lo que cumple con las características requeridas y la necesidad de controlar diversos elementos dentro del mismo (Arízaga *et al.*, 2014).

El invernadero permite controlar un cierto grado de los factores climáticos, definiéndose como una construcción agrícola que consta de una cubierta traslúcida y que, con ciertas características, evita daños meteorológicos y ayuda a controlar plagas y enfermedades; aunque el objetivo principal es favorecer las condiciones ambientales óptimas para desarrollar el crecimiento de un cultivo, se busca incrementar rendimientos y calidad del producto, así como una rentabilidad económica (Sánchez y Moreno, 2017).

En el mercado de construcción de invernaderos, existen una gran diversidad en donde se pueden encontrar estructuras de varios tipos, formas y tamaños. Las estructuras de invernadero modular tipo capilla permiten lograr mayor captación de luz seguidas de las estructuras de techo curvo, además existe un reducido salto térmico (es la diferencia de temperatura del interior y exterior) lograda por el efecto combinado con ventanas laterales y cenitales (Beltrano y Giménez, 2015).

El uso de invernaderos para producir cultivos representa características favorables obteniendo mayores ventajas que desventajas. En el cuadro 1 se pueden mencionar algunas.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de la producción bajo invernadero. Buendía et al., (2012); Morales et al., (2012); Rodríguez et al., (2013).

Ventajas
• Aumento en la calidad del producto y mayor rendimiento por unidad de superficie. • Protección completa del cultivo • Mayor precocidad en los cultivos • Reducción en costos de producción • Independencia de los fenómenos meteorológicos • Permite producir cosechas fuera de estación • Ahorro de agua, fertilizantes e insecticidas hasta un 60 % de lo que se usa en campo abierto • Evita el uso de maquinaria agrícola • La instalación es rápida, reduce la inversión y mano de obra • La recuperación de inversión se considera relativamente precoz.
Desventajas
• Poca capacidad para soportar la velocidad de los vientos mayores a 55 km/hora, requiriendo una óptima sujeción de anclas para proteger las instalaciones. • Inducir la polinización por falta de insectos. • Mayor incidencia de enfermedades bacterianas o fungosas • Se requiere conocimiento del manejo de invernaderos y cultivos • Inversión inicial costosa

2.2 Cultivo sin suelo

La hidroponía se considera una técnica de producción agrícola intensiva que consiste en alimentar el sistema radical con una solución de agua y nutrientes, estableciéndose como medio de cultivo un sustrato del suelo agrícola, que se caracteriza por proporcionar condiciones óptimas considerando características físicas, químicas y biológicas que le favorezcan al crecimiento de las plantas (Reyes, 2012).

La palabra hidroponía proviene del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo), refiriéndose al cultivo sin suelo, permitiendo que en estructuras simples o desarrolladas se pueda producir plantas aprovechando todos los espacios disponibles como azoteas, suelos infértiles, terrenos escabrosos, etc., apoyándose de sustratos o sistemas con suministro de nutrientes de forma

estática o circulante, pero considerando las variables ambientales (Beltrano y Giménez, 2015).

El sistema de producción sin suelo se puede dividir en tres grupos dependiendo del ambiente en donde se desarrollen las raíces. La Aeroponía es una técnica novedosa que consiste en proporcionar a las raíces una mezcla de agua con nutrientes que son suministrados mediante micro aspersores o nebulizadores que se encargan de mantener húmeda la raíz, estas raíces están suspendidas dentro de un contenedor (Licea, 2012; Reyes, 2012).

La técnica de producción en agua, se emplea como un sistema en donde la raíz obtienen sus requerimientos nutricionales de un medio líquido (solución nutritiva) considerando la ausencia de luz, por lo que, si no se tiene algún cuidado de este factor, puede haber un desarrollo de algas que lleve por consecuente un mal funcionamiento de la planta. La incorporación de oxígeno consiste en hacer fluir aire en el interior de la solución nutritiva y se inyecta desde una bomba de aire (Gutiérrez, 2011).

El cultivo de sustrato sólido debe considerar diversas características para establecer un ambiente óptimo para el desarrollo de las plantas, tomando en cuenta principalmente la humedad y oxigenación (tezontle, arena, grava, vermiculita, peat most, etc.). Este sistema está clasificado en tres tipos considerando el manejo. La primera clasificación describe que la aplicación de nutrientes se da por subirrigación en camas con sustrato de un diámetro de 3 mm y ésta solución fluye de manera rápida hacia un depósito. La segunda clasificación, determina un sistema con un sustrato de baja retención de mayor aireación, donde los poros permiten que exista un volumen mayor de agua, pero por la poca retención, se tiene que hacer el aporte de solución más frecuente. Como tercera clasificación se encuentran el uso de sustratos comerciales (lana de roca, perlita, fibra de coco y arena) que cuentan con las características óptimas para el manejo de cultivos (Reyes, 2012).

2.2.1 Solución nutritiva

La solución nutritiva se define como un conjunto de elementos que aportan nutrientes a las plantas para su desarrollo y éstos se encuentra disueltos en agua (Cajo, 2016).

Los elementos requeridos para el desarrollo de las plantas están otorgados por minerales como: carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno, potasio, fosforo, calcio, azufre, hierro, magnesio, manganeso, boro, cobre, zinc y molibdeno (Coronado, 2016).

Se han desarrollado diversas fórmulas de solución nutritiva, diferenciándose en el cultivo a emplear. En el cuadro 2 se presentan algunos requerimientos de nutrientes para preparar soluciones nutritivas para la producción de lechuga propuestas por algunos autores.

Cuadro 1. Requerimiento nutricional utilizado para el cultivo de lechuga en sistemas hidropónicos suministrados por una solución nutritiva (Coronado, 2016).

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

2.3 Cultivo de lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es considerada una de las especies más importantes en las hortalizas de hoja, teniendo una mayor demanda comercial para su consumo en restaurantes de comida rápida y otras actividades gastronómicas de consumo doméstico y público. Una de las principales características del cultivo de lechuga es su alta producción y su alto valor económico entre las hortalizas de todo el mundo. También se destaca como un alimento importante debido a su contenido en vitaminas y minerales. La lechuga, es un cultivar que permite generar mediante hidroponía productos de corte fresco de alta calidad durante todo el año (Solís, 2001; Jaques y Luis, 2005; Carrillo et al., 2015; Solís, 2017).

La lechuga es una planta anual, su raíz se desarrolla de forma columnar y pivotante. La forma de las hojas establece una unión central entrelazadas con un color verde pálido, adaptándose a una forma redonda dependiendo de la variedad (Gutiérrez, 2011).

Las especies de lechugas se clasifican botánicamente en cuatro según (Maroto, 2002):

Lactuca Sativa var longifolia Lam: este tipo de lechugas forman un verdadero cogollo, se desarrollan en invierno y verano (lechuga Romana, aunque en México corresponden al tipo orejonas.

Lactuca Sativa var inybarcea Hort: este tipo de lechuga se clasifican por desarrollar hojas sueltas (no cogollo) y dispersas.

Lactuca Sativa var augustana Irish: se distinguen porque el tallo es la parte comestible, las hojas son puntiagudas y lanceoladas.

Lactuca sativa var capitata Lam: ésta lechuga forma un cogollo apretado por las hojas, y por esta característica se divide en dos grupos: hojas consistente y hoja mantequilla.

La lechuga también puede agruparse según las variedades cultivadas, las cuales se encuentran de este tipo: Lechuga mantecosa, arrepollada, iceberg, Batavia, maravilla, romana, grasse o latina, tallo o esparrago, entre otras (Coronado, 2016).

En el cuadro 3 se muestra la cantidad de nutrientes que proporciona diferentes variedades de lechugas que comúnmente se comercializan.

Cuadro 2. Análisis de elementos nutrimentales en diversos tipos de lechuga comercial por cada 100 gramos de peso fresco (Gutiérrez, 2011).

Elemento	Mantequilla (utilizada)	Romana (utilizada)	Crispa	Escarola	Hoja verde
<i>Agua, g</i>	95.6	94.6	95.6	95.6	95.1
<i>Energía, Kcal</i>	13.0	17.0	14.0	16.0	15.0
<i>Proteína, g</i>	1.35	1.23	0.90	1.33	1.36
<i>Grasa, g</i>	0.22	0.30	0.14	0.22	0.15
<i>Carbohidratos, g</i>	2.23	3.28	2.97	2.26	2.79
<i>Fibra dietética, g</i>	1.10	2.10	1.20	0.90	1.30
<i>Azúcar total, g</i>	0.94	1.19	1.76	0.48	0.78
<i>Calcio, mg</i>	35.0	33.0	18.0	33.0	36.0
<i>Hierro, mg</i>	1.24	0.97	0.41	1.20	0.86
<i>Magnesio, mg</i>	13.0	14.0	7.0	12.0	13.0
<i>Fósforo, mg</i>	33.0	30.0	20.0	28.0	29.0
<i>Potasio, mg</i>	238.0	247	141	187	194
<i>Sodio, mg</i>	5.0	8.0	10.0	25.0	28.0
<i>Zinc, mg</i>	0.20	0.23	0.15	0.20	0.18
<i>Cobre, mg</i>	0.016	0.048	0.025	0.028	0.029
<i>Manganeso, mg</i>	0.179	0.155	0.125	0.203	0.250
<i>Selenio, mg</i>	0.60	0.40	0.10	1.50	0.60
<i>Vitamina A, IU*</i>	3312	5807	502	7492	7405
<i>Vitamina B 6, mg</i>	0.082	0.074	0.042	0.100	0.090
<i>Vitamina C, mg</i>	3.70	24.0	2.80	3.70	18.0
<i>Vitamina E, mg</i>	0.18	0.13	0.18	0.15	0.29
<i>Tocoferol, mg</i>	0.27	0.36	0.09	0.24	0.37
<i>Vitamina K, mg</i>	102.3	102.5	24.1	140.3	73.6
<i>Niacina, mg</i>	0.357	0.313	0.123	0.321	0.375
<i>Ácido, mg</i>	0.150	0.142	0.091	0.144	0.134
<i>Pantoténico</i>					
<i>Riboflavina, mg</i>	0.062	0.067	0.025	0.077	0.080
<i>Tiamina, mg</i>	0.057	0.072	0.041	0.064	0.070

*Conversión biológica que representa 0.3 microgramos de retinol y por otro lado 0.6 microgramos de betacaroteno.

2.3.1 Acumulación de nitratos

La lechuga es una de las principales hortalizas de hoja en México; sin embargo, es también una de las cultivos que más exponen nitratos (NO_3^-) que al ser consumidos y transformados en nitritos (NO_2^-), representan un problema a la salud, generando compuestos cancerígenos y causar metahemoglobinemia (Gili *et al.*, 2012; Lara *et al.*, 2019).

La acumulación de (NO_3^-) está directamente relacionado con los factores ambientales como la humedad atmosférica, la cantidad de agua en el sustrato, la temperatura del ambiente, la radiación y el fotoperiodo; considerando también factores agrícolas son, principalmente: dosis y tipos de fertilizantes, momento de aplicación, etc.(Gili *et al.*, 2012).

La norma Europea 1258/2011 menciona los niveles máximos de la concentración de (NO_3^-) en lechuga en invernadero cultivada bajo invernadero, en el cuadro 4 se mencionan algunos productos alimenticios y su contenido máximo de nitratos.

Cuadro 3. Niveles máximos de NO₃⁻ establecidos por el Reglamento N° 1258/2011 (Comisión Europea, 2011).

Producto alimenticio		Contenido máximo (mg NO ₃ ⁻ /kg)
1.1	Espinacas frescas (<i>Spinacea oleracia</i>)	3500
1.2	Espinacas conservadas, congeladas o ultra congeladas	200
1.3	Recolectadas entre de octubre y marzo	
	Lechuga fresca (<i>Lactuca sativa</i> L.) (lechugas en invernadero y cultivadas al aire libre) menos las lechugas que se describen en el punto 4	• Lechugas cultivadas en invernadero 5000 • Lechugas cultivadas al aire libre 4000
	Recolectadas entre abril y septiembre	
		• Lechugas cultivadas en invernadero 4000 • Lechugas cultivadas al aire libre 3000
1.4	Lechugas Iceberg	• Lechugas cultivadas en invernadero 4000 • Lechugas cultivadas al aire libre 3000
1.5	Rúcula (<i>Eruca sativa</i> , <i>Diplotaxis sp.</i> , <i>Brassica tenuifolia</i> , <i>Sisymbrium tenuifolium</i>)	Recolectadas entre octubre y marzo 7000 Recolectadas entre abril y septiembre 6000
1.6	Alimentos de cereales y alimentos lactantes para niños de pequeña edad	200

2.4 Factores ambientales que favorecen el cultivo de lechuga

2.4.1 Temperatura

La temperatura influye directamente en el crecimiento de plantas, ya que, con una temperatura elevada, los procesos químicos producidos dentro de la planta por enzimas proceden rápidamente, y de otra manera al disminuir o elevarse la temperatura, la actividad enzimática comienza a deteriorarse, dando como resultado estrés, limitando el crecimiento y con el tiempo la planta muere, por lo

que se recomienda mantener a la planta en niveles óptimos de temperatura para una maduración rápida y exitosa, por lo tanto la temperatura del agua y del aire deben ser monitoreados y controlados (Brechner y Both, 2005; Azcón *et al.*, 2008).

2.4.2 Humedad relativa

La humedad relativa que se encuentra dentro de un invernadero se relaciona directamente con la transpiración de las plantas, por lo que, una humedad relativa elevada del invernadero causa que la planta tenga menor agua para transpirar, provocando menos transporte de nutrientes desde las raíces hasta las hojas y menor refrigeración de las superficies de las hojas (Brechner y Both, 2005).

Se debe tener en cuenta que una humedad alta además de provocar problemas en el desarrollo de la planta, también influye en la creación y propagación de enfermedades principalmente fungosas (Azcón *et al.*, 2008).

2.4.3 Energía Radiante

La medición de luz se realiza por un sensor cuántico, que mide los niveles de radiación fotosintéticamente activa (por sus siglas en inglés, PAR) en unidades $\frac{mol}{m^2}/s$. La radiación PAR es la luz útil para el desarrollo de fotosíntesis en las plantas. Las mediciones de PAR dan una indicación de la posible cantidad de fotosíntesis y del crecimiento de las plantas (Brechner y Both, 2005).

2.4.4 pH

El pH corresponde a la agrupación de iones de hidrógeno contenidas en una solución, su medida se encuentra dentro de un rango de 0 a 14, en donde de 0 a 6.9 es considerada una concentración ácida y de 7.1 a 14 es alcalina, la medición neutra se establece como 7, que determina un equilibrio entre iones de moléculas de hidrógeno (H⁺) e iones de moléculas de hidróxido (OH⁻); el objetivo del factor pH es controlar la disponibilidad de sales de los fertilizantes y en un cultivo de lechuga el pH óptimo se encuentra dentro del rango de 5.5 y 6 (Brechner y Both, 2005).

2.4.5 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) se define como una medida indirecta del contenido de sales que se encuentran en una solución, el agua cuando es purificada (destilada y deionizada), no tiene conductividad eléctrica. Al preparar solución nutritiva e ir agregando sales, se va incrementando la conductividad, por lo mismo, entre más concentrada requiera la solución un cultivo, más CE se registrará en la misma. Al irrigar un cultivo con solución nutritiva, a medida que los nutrientes son absorbidos por las plantas, el nivel de CE se reduce por disminuir la cantidad de sales en la solución, y, por otro lado, el aumento de la CE se debe cuando el agua se elimina de la solución a través de procesos de evaporación y transpiración. El control de una solución con una CE alta, se regula con agua pura, y si la CE disminuye, se puede aumentar mediante la adición de más sales (Brechner & Both, 2005). La CE se mide en mmhos/cm o dS/m que es lo mismo. Se refleja 1 mmho/cm cuando se agregan 240 g de sal/1000 L de agua y 950 g de sal/1000 L de agua cuando se trata de las sales más conductoras y menos conductoras de electricidad, respectivamente; aunque cuando no se sabe de qué tipo de sales se trata, se maneja como promedio 850 g/1000 L (Cepeda *et al.*, 2018).

2.5 Sistema de balsas flotantes

El sistema de producción en mesas, balsas, raíz flotante o también conocida como hidroponía profunda, es uno de los sistemas alternativos para la producción de hortalizas principalmente de hoja que, se caracteriza principalmente por suministrar solución nutritiva en una cama o contenedor e implementar un soporte de sujeción para las plantas, donde la mayoría de los casos se utiliza una placa de unicel (material de poliestireno expandido), que protege a la solución nutritiva y además otorga soporte a las plantas a través de orificios que, dado que la raíz de la planta se encuentra sumergida en una solución concentrada de nutrientes para que la planta los aproveche, dicha solución debe estar

continuamente en movimiento para aportar oxígeno a la raíz, para ello se utiliza una bomba de aire que suministra oxígeno (Carrasco *et al.*, 2006; Gordo, 2017).

En el cuadro 5 se observa que con el sistema de balsas flotantes se tiene un mayor rendimiento en producción y precocidad en la cosecha, además de hacer eficiente el recurso hídrico y nutrientes comparado con los otros sistemas de producción hidropónica (Moreno *et al.*, 2015).

Cuadro 4. Esquemas de uso del agua en lechuga en diferentes sistemas de cultivo hidropónico (Moreno *et al.*, 2015).

Sistema de cultivo	Gasto (litro * m ²)	Ahorro (%)	Consumo (litro * planta ⁻¹)	Eficiencia (litro * kg ⁻¹)	Rendimiento (kg * m ²)
Sustrato sin recirculación	89.1	-	2.8	12.6	7.03
Sustrato con Recirculación	76.0	14.3	2.3	10.8	7.02
Balsa flotante	65.8	33.6	2.0	9.0	7.31

2.6 Sistema de monitoreo

El establecer un sistema para controlar las condiciones climáticas dentro de un invernadero es de suma importancia, ya que, encontrándose la planta en condiciones óptimas, genera un rendimiento significativo (incluyendo productividad y calidad) y esto conlleva a un sistema de producción rentable (Molina *et al.*, 2010).

Conocer las condiciones ambientales de un cultivo genera un control de sus requerimientos y necesidades, evitando estrés en la planta, y medir con dispositivos de forma manual en el campo puede resultar una actividad laboriosa y consumir mucho tiempo. Para ello, la instalación de un dispositivo de monitoreo electrónico puede permitir un funcionamiento continuo y desatendido, garantizando un registro completo y preciso de las variables (Fisher, 2007).

En la actualidad, sabemos que es importante implementar nuevas tecnologías para mejorar los medios técnicos, con el fin de controlar con más eficacia las condiciones de la producción (Roca y Florian, 2007).

Una de las principales desventajas de utilizar tecnología corresponde a los altos costos que representa la adquisición de instrumentación y sistemas de monitoreo, además de que en México es limitado y para obtenerlo se tiene que importar de empresas. Para dar solución a esa problemática se han propuesto sistemas tecnológicos que reducen los costos, tiempos de transporte y tecnología eficiente (Cisneros *et al.*, 2014).

Un sistema de monitoreo puede emplearse en diferentes ambientes y sistemas de producción, permitiendo obtener datos en tiempo real con una visualización amigable y de fácil manejo (Pablo *et al.*, 2015).

Domingues, *et al.*, (2012) desarrollo mediante el monitoreo de variables de un sistema de lechugas hidropónicas, un sistema automatizado para controlar el pH de una solución y su CE. Considerando que en un sistema hidropónico el pH y la CE sufren variaciones continuas, requiriendo hacer un monitoreo las 24 horas durante todo el ciclo de producción y conforme al requerimiento de la solución, suministrar ácido, base o nutrientes, ajustando válvulas o solenoides.

Lugo *et al.*, (2013) desarrollaron un sistema de monitoreo ambiental para invernaderos incluyendo la adaptación de software y hardware libres. La solución del problema planteado fue generar un sistema utilizando instrumentación de bajo costo, eficientes y confiables, comparando las mediciones con los obtenidos en sensores comerciales, resultando una similitud en instrumentación de fácil adquisición con instrumentación comercial. Utilizaron la plataforma Arduino, monitoreando variables como velocidad del viento, radiación solar, temperatura y humedad relativa.

Yang et al., (2017) realizaron un diagnóstico para equipos de monitoreo y control de calidad del agua en acuicultura, monitoreando las variables de pH, conductividad eléctrica, temperatura y nivel del agua, obteniendo métodos para identificar las principales fallas en los sistemas y optimizar su funcionamiento.

Chang et al., (2018) mencionan que la hidroponía puede mejorar la eficiencia de producción y alcanzar objetivos de ahorro de energía, reducción de carbono y protección del medio ambiente. Para ello se requiere de un monitoreo en la composición de la solución nutritiva utilizando instrumentos de medición y reponer el requerimiento de nutrientes necesario para mantener la estabilidad y la solidez del sistema. Estos autores desarrollaron un sistema en donde se evaluó la conductividad eléctrica, el pH, oxígeno disuelto y temperatura. Con el monitoreo y los valores obtenidos, se implementó un sistema que repuso nutrientes según fuera necesario. Desarrollando un método de control basado en reglas difusas. Propusieron un sistema donde, el caudal se ajustó mediante válvulas reguladoras de flujo en función del nivel y error de los valores de CE y pH, así como la base de datos de conocimientos.

2.6.1 Microcontrolador

Para un buen manejo de los factores que influyen dentro de un invernadero, se ha optado el uso de los microcontroladores, los cuales mantienen de manera eficaz un control de las variables dentro del sistema de producción (Gordo, 2017).

Arduino representa una herramienta fácil de utilizar, cuenta con una plataforma abierta con software y hardware flexibles, su programación está basado en un lenguaje propio de alto nivel de Processing y para adquirirlo puede descargarse directamente de la plataforma por ser un software gratuito (Ossa, 2017).

Arduino en su versión Mega 2560 corresponde a un microcontrolador eficaz que tiene entradas y salidas digitales, salidas PWM (modulación de anchura de pulso), entradas analógicas, UARTs (puertas series), tiene un oscilador de 16MHz, conector de alimentación, conexión USB, conector ICSP y pulsador para

el reset (Perea, 2016). En el cuadro 6 se puede detallar las características del arduino Mega 2560.

Cuadro 5. Características del Arduino Mega 2560 (Arduino, 2019).

Características Arduino versión Mega 2560
• ATmega 2560 (microprocesador) • Alimentación con tensión de 7-12 V (como recomendación) • Estabilización y regulación de +5Vcc • Entradas y salidas digitales (54 líneas considerando PWM) • Salidas PWM (14 de las 54 líneas) • Entradas analógicas (16 líneas) • Corriente de las entradas máxima continua: 40mA • Alimentación a 3.3V con 50mA • Memoria de 256Kb • Memoria SRAM establecida de 8Kb (datos y variables) • Reloj (velocidad de 16MHz) • Dimensiones de 100 x 50 mm

La alimentación del microprocesador Arduino consta de dos tipos, mediante el puerto USB o una fuente externa. Al utilizar como alimentación una fuente externa, se tiene que realizar la conversión de corrientes de AC/DC regulando el voltaje para que funcione de manera óptima la placa. Al utilizar baterías, el voltaje recomendado se encuentra de 7V a 12V (Gordo, 2017).

2.6.2 Módulos

El reloj de tiempo real (RTC) es un dispositivo electrónico para obtener mediciones de tiempo, está compuesto de un resonador con material de cristal que viene integrado en el sistema; el uso de este módulo proporciona diversas ventajas como la reducción del consumo de la energía, así como la precisión y sobre todo, evita que el microcontrolador realice las tareas de tiempo; por lo

regular este módulo tiene una batería externa, la cual mantiene el tiempo si en casos drásticos se pierde la alimentación (Gordo, 2017).

Las pantallas de cristal líquido (LCD), tiene como función proveer una interfaz sencilla para el usuario, que permite programar y visualizar fácilmente caracteres o números provenientes del análisis interno del microcontrolador, además, el consumo energético es menor (Gutiérrez, 2016).

2.6.3 Sensores

2.6.3.1 Sensor de temperatura y humedad relativa

Los dispositivos para medir la temperatura tienen la capacidad de convertir las señales físicas producidas por las variaciones en señales eléctricas para su post-procesamiento. Hay tres tipos principales de sensores, detector de temperatura de resistencia (RDT, por sus siglas en inglés), termopares y termistores, siendo más utilizado el RDT por su precisión (Perea, 2016).

El sensor DHT22 sirve para medir la humedad y la temperatura (Rincón *et al.*, 2016; Vargas *et al.*, 2013). Es un sensor de alta integración que cuantifica las variables medidas que pasa por un módulo de procesamiento digital enviando los valores por un protocolo de comunicación I2C (Figueroa y Castañeda, 2016).

La calibración del sensor DHT22 está dada por el fabricante, asegurando una confiabilidad en la medición. Este sensor es eficaz considerando su tiempo de respuesta, su fiabilidad y excelente calidad, tiene integrado un microcontrolador que permite su función. La medida de los factores se encuentra dentro de los siguientes rangos: humedad relativa entre 0 y 100% y temperatura ambiental en el rango de -40° C y 80° C, con una alimentación de funcionamiento de 3.3-6VDC (Ossa, 2017).

2.6.3.2 Sensor de temperatura del cultivo

Un módulo de termómetro infrarrojo (por sus siglas en inglés, IRT), modelo MLX90614 mide la temperatura de la hoja de la planta, consta de un chip detector de termopila sensible a los rayos infrarrojos y un chip acondicionador de señal integrado en una sola unidad; el convertidor analógico a la digital de 17 bits integrado en el sensor y la electrónica de procesamiento de señal, están contenidos en un pequeño paquete de metal de 8 mm de diámetro y 4 mm de alto; un filtro óptico está integrado en el paquete para proporcionar inmunidad ambiental sobre la luz solar, lo que resulta sensible a la radiación infrarroja en un rango de 5.5 a 14 metros, el microcontrolador se comunica con el sensor mediante el protocolo de comunicaciones I2C y las mediciones de temperatura se emiten en 0.02 °C, consta de una precisión de ± 0.5 °C y una resolución de 0.02 °C (Fisher y Kebede, 2010).

2.6.3.3 Sensor de conductividad eléctrica

El sensor ES-2 es un diseño de Decagon Device®, que mide la conductividad eléctrica y la temperatura del agua que se encuentre en un tubo o un tanque de almacenamiento. Para lograr las mediciones el sensor cuenta con un termistor en contacto térmico con la sonda que proporciona la temperatura del agua, mientras que los tornillos de la superficie del sensor forman una matriz de cuatro electrodos para medir la conductividad eléctrica. Mide temperaturas de -40 °C hasta 60 °C, con una exactitud de ± 1 °C y una resolución de 0.1 °C. La medición de la conductividad eléctrica se encuentra dentro del rango de 0 a 120 dS/m, con una exactitud de ± 0.01 dS/m o ± 10 % y una resolución de 0.001 dS/m. El tiempo de respuesta de la sonda es de 300 ms (milisegundos) y su alimentación es de 3.6 a 15VDC, 0.03mA. Para la adquisición de datos se utiliza el protocolo de comunicación SDI-12 (Decagon Device, 2014).

2.6.3.4 Sensor de pH

El uso de electrodos con preamplificadores integrales para medir el nivel de pH es un requerimiento para la adquisición de datos precisos en aplicaciones a nivel de laboratorio o industrial. El sensor de pH modelo Phe-1304 de la marca OMEGA® puede interactuar directamente con equipo que acepta señales de entrada de milivoltios con 10k Ω de impedancia de entrada, como un dato a la interfaz de adquisición o multímetro (OMEGA, 2018).

Los preamplificadores convierten la alta impedancia de señal de milivoltios del electrodo a un nivel bajo de señal de impedancia permitiendo recorrer señales sin pérdida alguna. El sensor da lecturas dentro del rango de +414.1 mV (pH 0) a -414.1 (pH 14), resiste temperaturas de 0 a 100 °C y requiere ± 1.5 Vdc a ± 9 Vdc, 0.5 mA como fuente de alimentación (OMEGA, 2018).

El sensor es utilizado en sistemas automatizados en invernaderos para control de fertirrigación en la producción hidropónica de hortalizas, lo que hace que sea un dispositivo confiable en la medición de datos (Steidle *et al.*, 2014).

2.6.3.5 Sensor de radiación PAR

La fotosíntesis es impulsada principalmente por fotones de luz con ondas de 400 y 700 nanómetros, lo que se conoce como radiación fotosintéticamente activa o luz PAR. La intensidad de luz PAR se conoce como la densidad de flujo de fotones fotosintéticos que se mide en unidades de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Para medir esta variable se utilizó el sensor de luz PAR modelo 3668I de la marca Spectrum®. El sensor tiene un rango de medición de 0 a 2500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ± 5 %, con una entrada de voltaje de 3.0-5.0 VDC y una salida de voltaje de 0-2.5V (Spectrum, 2018).

2.7 Modelación

Dentro de los objetivos que se plantean al producir hortalizas en invernadero, es el obtener mayores rendimientos con características óptimas que le puedan dar una calidad deseable en el mercado, para ello se requiere de técnicas que ayuden al control de las variables ambientales para optimizar el desarrollo de las plantas y una opción es el uso de modelos matemáticos que pronostiquen el crecimiento de un cultivo a través del tiempo (López *et al.*, 2004).

Los modelos matemáticos de hortalizas permiten probar hipótesis científicas y, además, una de las ventajas que permiten los modelos es pronosticar la producción de un cultivo en invernadero sin realizar experimentos de elevado costo; dentro de la clasificación de modelos matemáticos podemos encontrar tres grupos, modelos empíricos, mecanicistas y teleonómicos (López *et al.*, 2005). Los modelos empíricos son descripciones directas de datos sin proporcionar alguna explicación de los mecanismos subyacentes, fueron diseñados principalmente para usar observaciones sin asignar significancia fisiológica de los parámetros (Zhang *et al.*, 2008). Los modelos clasificados como teleonómicos consisten en definir una meta, de tal manera que todo se relacione y formule a través de los objetivos que se plantean. Por último, los modelos mecanicistas están relacionados con un sistema de ecuaciones diferenciales de carácter ordinario no lineal y su objetivo de éstas es describir el comportamiento de las variables de salida del sistema; el uso del modelo mecanicista demanda análisis, calibración y validación apropiada (López *et al.*, 2005).

La calibración de un modelo matemático se define como el proceso cambio de los valores que tienen los parámetros para obtener un mejor ajuste entre la predicción (simulación) y los datos observados. Generalmente, los parámetros sujetos de calibración son aquellos que presentan incertidumbre, que afectan el comportamiento del modelo en forma más sensible, y que afectan el comportamiento del modelo en forma que se obtiene mejor ajuste entre las mediciones y datos simulados; de forma práctica son los parámetros que un

análisis de sensibilidad mostró como más importantes para los estados y/o salidas del modelo (López *et al.*, 2004).

La validación de los modelos es un procedimiento para establecer la unidad de un modelo para una aplicación (Juárez, 2010).

2.7.1 Modelos del crecimiento de lechuga

Varios modelos han sido propuestos para modelar el crecimiento de lechugas y se han desarrollado diversos estudios por la facilidad de producción que tiene el cultivo (López *et al.*, 2005).

Modelo de Sweeney

Sweeney *et al.* (1981) desarrollaron un modelo para el cultivo de lechugas, considerando como variables de estado la materia seca estructural y no estructural (ignorando la materia seca de las raíces); las variables de entrada del modelo están dadas por la radiación y la temperatura; y las variables de salida son la materia seca y el área foliar. El modelo por si solo requiere para su solución un cálculo de funciones algebraicas de carácter no lineal, funciones exponenciales relacionadas con la acumulación de materia seca estructural y finalizando con una función exponencial para la fotosíntesis. El modelo requiere de parámetros que necesitan estimarse. Este modelo se validó con datos obtenidos de una experimentación en Inglaterra, que obtuvo como resultado una predicción puntual de la producción de biomasa del cultivo (López *et al.*, 2005; Juárez, 2010).

Modelo de Van Henten

Otro modelo para el cultivo de lechugas es el de Van Henten (1994), establece como variables de estado el peso seco estructural y no estructural, obteniendo la suma de los dos pesos como el total. El peso seco no estructural está dado por el contenido de carbohidratos y almidón; y el peso seco estructural incluye los componentes totales del peso seco de la planta restando el contenido del peso

seco no estructural. Como variables de entrada del modelo están la radiación PAR, la concentración de CO_2 y la temperatura ambiental dentro del invernadero. Las estimaciones de los 17 parámetros requeridos se deben de realizar. Por el desarrollo del análisis de sensibilidad de este modelo se resume que el parámetro de eficiencia de uso de luz y eficiencia de conversión de materia seca no estructural son los más influyentes en el modelo. La validación del modelo se desarrolló en invernaderos holandeses en dos ciclos del año (otoño-invierno e invierno-primavera) (López *et al.*, 2005; Juárez, 2010).

Modelo NICOLET

El modelo NICOLET (Nitrate Control in Lettuce) es un modelo propuesto para un cultivo de lechugas que tiene dos variables de estado relacionado con la cantidad de carbono contenido en las vacuolas y en la estructura celular. Para calcular la concentración de nitratos en las vacuolas es necesario desarrollar ecuaciones algebraicas a partir de una correlación opuesta de la concentración de carbono y de nitrógeno presentes en éstas. El modelo tiene como salida el peso seco, el peso fresco y los nitratos contenidos en la planta. En el modelo la fuente de nitrógeno se considera presente en todo momento, aunque en otras versiones de este modelo ésta definición no es tan restringida. El modelo NICOLET es utilizado principalmente para poder desarrollar estrategias para realizar un control más sofisticado y preciso de los nitratos contenidos en la lechuga (López *et al.*, 2004; López *et al.*, 2005).

Modelo de Pearson

El modelo de Pearson es un modelo mecanicista que modela los efectos del cambio del ambiente sobre el crecimiento, producción y madurez de la lechuga (Juárez, 2010).

Modelo de Willcutts

El modelo Willcutts fue el desarrollo de una comparación de tres modelos matemáticos para determinar el óptimo de los rangos de fertilización de nitrógeno en diferentes variedades del cultivo de lechuga (Juárez, 2010).

Modelo de Zhang

El modelo Zhang (2008) es un modelo mecanicista dinámico para predecir la acumulación de biomasa en la lechuga, así como la cantidad de nitrógeno que se acumula durante el desarrollo del cultivo. Así mismo se han realizado trabajos de modelación en la cinética de la cantidad de nutrientes que hay en un cultivo de lechuga, especialmente nitrógeno, mismo que se han calibrado y validado (Juárez, 2010).

2.8 Referencias

- Arduino (2019), MEGA 2560. *DATA SHEET*. RADIONICS, EE.UU.2019.
- Arízaga, J. A., Sánchez, I., y González, F., (2014). Sistema de monitoreo de variables ambientales utilizando de ethernet. *Revista Colombiana de Física*. 2-5. doi: 10.13140/2.1.1162.1123
- Azcón, J., Fleck, I., Aranda, X., Gómez, N. (2008). *Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. Fundamentos de Fisiología Vegetal*. pp. 247-263. Madrid, España. McGraw Hill. segunda edición. <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/FisioVegetal/13.pdf>.
- Beltrano, J., y Giménez, D. (2015). *Cultivo en hidroponía*. In Libros de Cátedra. pp. 181. Buenos Aires, Argentina. UNLP. Primera edición. doi: 10.1039/c0dt00588f.
- Brechner, M., y Both, A. J. (2005). *Hydroponic Lettuce Handbook*. Cornell University CEA Program., 48. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-13-0358

- Buendía, R. A., Cedillo, A., y Vega, G. (2012). *Diseño de un invernadero automatizado con cultivo hidropónico vertical de lechugas en el Rosario, Cuautitlán, Estado de México*. (Tesis de pregrado). Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional. México. Recuperado de: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12925/im226.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Cajo, A. (2016). *Producción hidropónica de tres variedades de lechuga (lactuca sativa l), bajo el sistema nft, con tres soluciones nutritivas*. (Tesis de pregrado). Ciencias Agropecuarias, Universidad Técnica de Ambato. Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/23421/1/Tesis-136> Ingeniería Agronómica -CD 413.pdf.
- Carrasco, G., Tapia, J., y Urrestarazy, M. (2006). Contenido de nitratos en lechugas cultivadas en sistemas hidropónicos. *IDESIA*. 24 (1), 25-30.
- Carrillo, G. M., Herrera, A. L., Evelia, L., Bernal, P., Flores, M. L., Jesús, J., Mejía, A. y Llamas, L. (2015). Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno. *Terra Latinoamericana*. 33 (7), 251-260. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n3/2395-8030-tl-33-03-00251.pdf>
- Comisión Europea (2011). Reglamento (UE) N° 1258/2011 DE LA COMISIÓN EUROPEA. *Diario Oficial de la Unión Europea*. 8 (12), 1-5. doi: 10.2903/j.efsa.2010.1935.
- Cepeda, A., Valdez, L., Castillo, A., Ruiz, N., Robledo, V., y Mendoza, R. (2018). Lettuce response to electrical conductivity with surface irrigation and sub-irrigation systems. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5 (7), 1233-1245. doi: 10.29312/remexca.v5i7.868
- Chang, C., Hong, G., y Fu, W. (2018). Diseño y ejecución de un sistema de riego a soluciones nutrientes basado en conocimientos para aplicaciones hidropónicas. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 61 (2), 369-379. doi: 10.13031/trans.11564
- Cisneros, H., Vargas, E., y Ortega, A. (2014). *Implementación de un sistema de instrumentación eficiente y rentable para invernaderos*. A. Lara (Presidencia). V Congreso Internacional de la Ciencia de Sistemas. Guanajuato, México. doi: 10.13140/2.1.2332.6083

- Coronado, A. (2016). *Uso de silicio en lechuga (Lactuca Sativa) en sistema NFT y raíz flotante*. (Tesis de pregrado). Agronomía en Horticultura Protegida, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Decagon Device (2014), ES-2. *DATA SHEET*. Decagon Device Inc., EE.UU. 2014.
- Domingues, D. S., Takahashi, H. W., Camara, C. A. P., y Nixdorf, S. L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 84 (12), 53-61. doi: 10.1016/j.compag.2012.02.006
- Figueroa, L., y Castañeda, G. (2016). *Sistema de monitoreo de temperatura, humedad y gas para generar alertas de un ambiente no adecuado en los jardines infantiles*. (Tesis de pregrado). Facultad Tecnológica, Universidad Francisco José de Caldas. Colombia.
- Fisher, D. K. (2007). Automated collection of soil-moisture data with a low-cost microcontroller circuit. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 23 (4), 493-500.
- Fisher, D. K., y Kebede, H. (2010). Application note A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. *Computers and Electronics in Agriculture*. 74 (1), 168-173. doi: 10.1016/j.compag.2010.07.006
- Gili, A. A., Baudino, E. M., Siliquini, O. A., Morazzo, G. C., y Sánchez, T. M. (2012). Contenido de nitratos y proteína en lechugas crespa y amaranto hortícola producidos con enmienda y urea. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 18 (2), 217-226. doi: 10.5154/r.rchsh.2011.02.027
- Gordo, A. D. (2017). *Desarrollo e implementación de un invernadero automatizado con cultivo hidropónico y aplicación móvil para el seguimiento de datos*. (Tesis de pregrado). Departamento de Control Automático, Universidad de Sevilla. España.
- Gutiérrez, J. (2011). *Producción de lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva*. (Tesis de maestría). Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Gutiérrez, J. (2016). *Equipo para medir la conductividad eléctrica del suelo en tiempo real*. (Tesis de maestría). Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. México.

- Jaques, C., y Luis, J. (2005). Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*. 3 (1), 11-16.
- Juárez, A. (2010). *Validación del modelo matemático de crecimiento Nicolet b3 para el cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero*. (Tesis de maestría). Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Antonio Narro. México.
- Lara, A., Rojas, A., Romero, M., Ramírez, H., Crespo, E., Alcalá, J., y Loredó, C. (2019). Growth and NO₃⁻ accumulation in hydroponic lettuce with nitrate/ammonium ratios in two cultivation season. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 42 (3), 21-29.
- Licea, I. (2012). (2012). *Efecto de la solución nutritiva en el rendimiento de lechuga en dos sistemas hidropónicos: camas flotantes y aeroponía*. Universidad Autónoma de Querétaro. (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- López, I., Ramírez, A., y Rojano, A. (2004). Sensitivity analysis of a dynamic growth model for greenhouse. *Agrociencia*. 38 (6), 613-624.
- López, I., Ramírez, A., y Rojano, A. (2005). Modelos Matemáticos De Hortalizas En Invernadero: Trascendiendo La Contemplación De La Dinámica De Cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 11 (2), 257-267. doi: 10.5154/r.rchsh.2003.08.050
- López, I. L. C., Ruiz, A. G., Ramírez, A. A., y Vázquez, M. A. P. (2013). Análisis de Incertidumbre de un Modelo Para Lechugas (*Lactuca sativa* L.) Cultivadas en Invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 19 (1), 33-47. doi: 10.5154/r.rchsh.2011.09.049
- Maroto, J. (2002). *Horticultura herbácea especial*. pp. 704. Valencia, España. MundiPrensa. Quinta edición.
- Molina, J., Martín, B., Vázquez, S., y Sánchez, F. (2010). *Desarrollo de un sistema de adquisición de datos climáticos para un invernadero*. Promise (Presidencia). 12th International Conference on Project Engineering. Ciudad Real, España.
- Morales, E. R., Inzunza, E., López, R. M., Cardoza, L., García, E. E., Olguín, J. E., y Hernández, J. M. (2012). *Sistema de supervisión de temperatura de un invernadero mediante una comunicación inalámbrica*. (Informe). Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. México.

- Moreno, E., Sánchez, F., Gutiérrez, J., González, L., y Pineda, J. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 21 (1), 43-55. doi: 10.5154/r.rchsh.2013.12.047
- Omega (2018), PHE-1304. DATA SHEET. Omega Inc., EE.UU. 2018.
- Ossa, S. I. (2017). Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos. *Vector*. 12 (1), 51-60. doi: 10.17151/vect.2017.12.6
- Pablo, J., Vargas, B., y Navia, G. (2015). Desarrollo de un sistema de control para la captura y medición experimental de la eficiencia y curva característica i-v en tiempo real de un sistema fotovoltaico utilizando labview® y arduino. *INVESTIGACIÓN & DESARROLLO*. 1 (15), 49-64.
- Perea, J. (2016). *Diseño de un sistema de monitoreo, registro y control de temperatura y humedad para un cultivo de invernadero*. (Tesis de pregrado). Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- Reyes, C. (2012). *Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino en sistemas hidropónicos con recirculación de la solución nutritiva*. (Tesis de maestría). Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Roca, D., y Florian, P. (2007). *Un nuevo sistema de gestión integral automática de cultivos en invernaderos hidropónicos*. In Vida Rural. Vol. 1, pp. 40-42.
- Rodríguez, I., Posas, F., Fuentes, L., León, B., Rodríguez, L., Gómez, D., y Vásquez, M. (2013). *Agricultura Protegida*. In Innovaciones Tecnológicas. Vol. 1, pp. 1-36.
- Rosales, J. (2017). *Monitoreo y control climático de un invernadero a escala*. (Informe). Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Sánchez, F., y Moreno, E. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. pp. 397. Chapingo, México. UACH. Primera edición.
- Solís, O. (2001). *Producción de lechuga (Lactuca sativa L.) en sistema de raíz flotante (SRF)*. (Tesis de pregrado). Agronomía en Horticultura Protegida, Universidad Autónoma Chapingo. México.

- Solís, F. (2017). *Evaluación del rendimiento en el cultivo de lechuga (Lactuca Sativa), en sistemas hidropónicos y aeropónicos automatizados*. (Tesis de pregrado). Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Machala. Ecuador.
- Spectrum (2018), PAR Light Sensor. *DATA SHEET*. LightScout, EE.UU. 2018.
- Steidle, A., Zolnier, S., y Carvalho, D. (2014). Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 103 (1), 17-25. doi: 10.1016/j.compag.2014.02.001
- Sweeney, D., Hand, D., Slack, G., y Thornley, J. (1981). Modelling the growth of winter lettuce. *Academic Press.*, 217-229.
- Van Henten E.J., Van Henten G. (1994). Sensitivity analysis of a dynamic growth model of lettuce. *Journal Agricultural Engineering Res.* 59 (1), 19-33.
- Yang, H., Hassan, S. G., Wang, L., y Li, D. (2017). Fault diagnosis method for water quality monitoring and control equipment in aquaculture based on multiple SVM combined with D-S evidence theory. *Computers and Electronics in Agriculture*. 141 (1), 96-108. doi: 10.1016/j.compag.2017.05.016
- Zhang, K., Burns, I., y Turner, M. (2008). Derivation of a Dynamic Model of the Kinetics of Nitrogen Uptake Throughout the Growth of Lettuce: Calibration and Validation Derivation of a Dynamic Model of the Kinetics of Nitrogen Uptake Throughout the Growth of Lettuce: Calibration and Validation A. *Journal of Plant Nutrition*. 31 (1), 1440-1460. doi: 10.1080/01904160802208345

3 Sistema de monitoreo de variables ambientales para un cultivo de lechugas en balsas flotantes.

3.1 Resumen

Introducción: El monitoreo de las variables ambientales permite proporcionar al cultivo las condiciones óptimas para maximizar los rendimientos y disminuir el impacto ambiental.

Objetivo: Desarrollar y evaluar un sistema de monitoreo de variables ambientales para la producción de lechugas hidropónicas.

Metodología: Se diseñó y construyó un sistema de monitoreo y adquisición de variables ambientales dentro de un circuito integrado utilizando un microcontrolador Arduino para su comunicación. Se colocaron 3 subsistemas que corresponden a la alimentación, almacenamiento y visualización de datos en una pantalla. Se evaluó el sistema en un cultivo de lechugas hidropónicas, para comprobar su funcionalidad.

Resultados: Se obtuvo un prototipo que mide la temperatura del aire, temperatura de la planta, radiación solar PAR, conductividad eléctrica, temperatura de la solución nutritiva y pH. Se realizó una prueba en un ambiente real obteniendo los datos medidos y los ajustes realizados.

Limitaciones de estudio: Las pruebas de funcionamiento del prototipo solo se realizó una en un ciclo de cultivo. El almacenamiento de datos es limitado, por lo que, para poder extraer los datos, se requiere realizarlo con conexión USB, lo más conveniente es una base de datos por acceso remoto.

Originalidad: El sistema integra varios módulos y sensores en un mismo circuito, haciendo más complejo su diseño y construcción.

Conclusiones: Al integrar los módulos y sensores se generó un sistema de monitoreo de variables ambientales, realizando una prueba de campo en un ambiente real, que demostró ser eficaz, robusto y preciso para la adquisición de datos.

Palabras clave: Hidroponía, *Lactuca sativa L.*, invernadero, sensores, código abierto.

3.2 Introducción

Actualmente en México, la agricultura es considerada en el sector productivo, como una de las actividades importantes para el punto de vista económico, social y ambiental, ya que, de acuerdo a la demanda en la producción de alimentos y el incremento de la población, se torna en la preservación y cuidado del entorno (Fletes *et al.*, 2017). En la actualidad, la horticultura a nivel nacional, ha tomado un papel importante para la producción, por el aumento significativo en los rendimientos, utilizando innovadoras técnicas que han funcionado de manera adecuada, optando por disminuir la escasez del agua y obligando a optimizar este recurso (Morales *et al.*, 2012). El cultivo hidropónico no solo está asociado a mayores rendimientos de producción, sino que también permite un mejor control y estandarización del proceso de cultivo, lo que reduce los costos generales de producción (Domingues *et al.*, 2012). En la actualidad, sabemos que es importante implementar tecnología para mejorar los medios técnicos, con el fin de controlar con más eficacia las condiciones de la producción, a fin de que el cultivo produzca, en condiciones más favorables (Roca y Florian, 2007).

Los invernaderos son utilizados para aumentar la calidad, el rendimiento y el proceso productivo de un cultivo, además le permiten al agricultor tener un control eficiente de los factores ambientales mejorando la productividad de quien los utiliza (Rincón *et al.*, 2016). La producción de cultivos en invernaderos se estableció de manera óptima, ya que tiene la capacidad de separar las condiciones del ambiente externo con la del cultivo (Lugo *et al.*, 2013). Se ha aplicado la horticultura, especialmente para la producción fuera de temporada y para el cultivo de cultivos de alta calidad (Zhah y Ching, 2016). El cultivo en invernadero requiere de mayores en tiempos reducidos que el tradicional, sin embargo, garantiza una producción óptima con menores pérdidas y con una calidad de producto final elevada (Rodríguez *et al.*, 2004).

Una de las principales características en la producción hidropónica es la medición de variables ambientales que están en contacto con el cultivo, por lo que el registro manual, que es la manera tradicional en la adquisición de datos de campo, introducen fácilmente errores humanos y con procesos de recopilación adicional (Wang *et al.*, 2018). De hecho, éstos métodos se consideran mediciones directas, y son más simples, pero consumen mucho tiempo que simplemente, se podría ocupar en otras actividades (Fisher, 2007; Yeh *et al.*, 2013).

La mayoría de los cultivos hidropónicos se declaran improductivos, principalmente al manejo inadecuado de las variables ambientales y la mala preparación de los nutrientes de las plantas (Domingues *et al.*, 2012). Muchos estudios han investigado las tecnologías disponibles para controlar las variables del clima de invernadero que son importantes para la producción de cultivos de invernadero (Beveren *et al.*, 2015). Para favorecer la producción de un cultivo, es necesario optimizar el control del ambiente en el que se encuentra, para ello el uso de invernaderos toma importancia, ya que se pueden obtener producciones fuera de temporada, se hace eficiente el recurso hídrico, mantiene la calidad del producto, genera mayor rendimiento y se puede establecer en zonas marginales (Rodríguez *et al.*, 2004; Flores y Ortega, 2015; Alarcón *et al.*, 2018; Arias *et al.*, 2018). Para aumentar la producción de un cultivo es necesario optimizar la tecnología aplicada con técnicas de control dentro de un invernadero (Ponce *et al.*, 2017). El uso de la tecnología ha alcanzado una importancia en la producción de alimentos, ya que se ha establecido tecnología en sistemas de control principalmente en invernaderos, pudiendo monitorear el ambiente aéreo y radicular del cultivo (Rodríguez *et al.*, 2004).

Se han desarrollado muchos proyectos alrededor de la instrumentación y monitoreo en invernaderos (Rincón *et al.*, 2016), donde la tecnología de los sensores ha tomado gran importancia en todos los campos de la ciencia e ingeniería, y en algunos campos de la investigación y desarrollo (Aristizábal, 2016). Dentro de los sistemas de control, se considera eficazmente el monitoreo

de variables ambientales de un invernadero, ya que es una base para poder establecer una condición óptima, desde medioambientales, hasta la fertirrigación y el sistema sea capaz de obtener una producción con rendimientos significativos del cultivo (Molina *et al.*, 2010). Muchas investigaciones se han enfocado en el control automático, considerando todas las ventajas que éste representa (Gómez *et al.*, 2018).

Los sistemas automáticos de adquisición de datos tienen diverso enfoque para poder aplicarlos, recopilando datos continuamente a lo largo de la temporada de cultivo en todo momento (Fisher y Kebede, 2010). Las principales variables climáticas que pueden controlarse en un invernadero incluyen la temperatura, la humedad, la concentración de CO₂ y la intensidad de la luz a nivel de la planta (Arboleda *et al.*, 2011; Beveren *et al.*, 2015), así como el monitoreo de variables como la conductividad eléctrica, la concentración individual de iones y el pH (Steidle *et al.*, 2014). Los avances en la tecnología de los sensores, actuadores, y microcontroladores, son cada vez más eficaces, fiables y baratos, favoreciendo a la horticultura (Roca y Florian, 2007) y que, debido a su fácil adquisición, existe la posibilidad de aumentar la efectividad de los invernaderos. (Groener *et al.*, 2015).

La producción de lechuga (*Lactuca sativa*) ha sido la hortaliza con gran importancia en el mercado nacional e internacional (Martinez y Garcés, 2010). Se ha concluido que el uso de sistemas de balsa flotante representa un ahorro eficiente de agua y nutrientes, así como un rápido desarrollo y un crecimiento significativo de la lechuga a comparación de otros sistemas de producción (Moreno *et al.*, 2015).

El objetivo de la investigación es desarrollar y evaluar un sistema de monitoreo de variables ambientales para la producción de lechugas hidropónicas.

3.3 Materiales y métodos

El prototipo se desarrolló en cuatro etapas que integran el sistema de monitoreo de variables ambientales, las cuales se describen a continuación:

Etapas 1. Revisión de información y caracterización del sistema.

Se investigaron las variables y los parámetros que tiene mayor influencia en un sistema hidropónico como temperatura ambiente humedad relativa, temperatura de la planta, radiación fotosintéticamente activa (PAR), conductividad eléctrica, temperatura de la solución nutritiva y pH, buscando cada uno de los instrumentos de medición que se adapten a los sistemas de producción hidropónica, particularmente en balsas flotantes, haciendo un bosquejo entre los de mejor característica y resistencia para implementarlo en el sistema de monitoreo.

Etapas 2. Elección de los sensores y componentes.

El sistema para el monitoreo fue diseñado para medir las variables ambientales: temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), radiación PAR ($\mu\text{Mol}/\text{m}^2\text{s}$), temperatura del cultivo (°C), pH, conductividad eléctrica (dS/m) y temperatura de la solución nutritiva (°C). Una de las principales características que deben contar los instrumentos de medición son la adaptabilidad a diversos sistemas de producción hidropónico en condiciones de producción en invernadero, funcionales, robustos y de bajo costo para cada una de las variables ambientales a medir. Se seleccionó un microcontrolador Arduino Mega, siendo una plataforma electrónica de código abierto basado en un microprocesador ATmega2560. Para medir la temperatura del ambiente y la humedad relativa se utilizó el sensor DTH22, que incorpora un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire, la forma de obtener los datos es mediante una señal digital. La temperatura de la planta se midió con un sensor MLX90614 (Melexis), que a su vez mide la temperatura ambiente (°C). el sensor está integrado por un chip detector de termopila sensible a los rayos infrarrojos, un chip acondicionador de señal con un filtro óptico para proporcionar inmunidad ambiental y a la luz solar, siendo sensible a la radiación infrarroja en un rango de 5.5 a 14 m.

Para medir la radiación solar fotosintéticamente activa se utilizó un sensor LS3668I, usando un módulo que amplifica la señal analógica para la obtención de datos. El pH se midió con el sensor pH-1304, funciona con una fuente de alimentación de $\pm 1.5VDC$ a $\pm 9VCD$, a $0.5mA$ proporcionando una salida de pH de $0 = \pm 414.1 mV$ a $14 = -414.1mV$.

La adquisición de datos se realizó mediante un amplificador de señal, el cual fue conectado al microcontrolador a través de una señal analógica. Para la calibración del sensor se utilizaron soluciones alcalinas y ácidas de la marca OMEGA®. Para medir la conductividad eléctrica se utilizó el sensor ES-2, que adicionalmente mide la temperatura de la solución en donde se encuentre midiendo ($^{\circ}C$). Tiene una exactitud de $\pm 0.01 \frac{dS}{m}$ con un rango de medición de 0 a $120 \frac{dS}{m}$, el tiempo de respuesta entre cada medición de 300 milisegundos, para su funcionamiento se requiere una fuente de alimentación de 3.6 a 15VDC, 0.03 mA durante el lapso de medición. La adquisición de datos fue a través de la comunicación SDI-12. El sistema de almacenamiento utilizó un módulo MicroSD con una memoria genérica de almacenamiento con capacidad de 8GB, la comunicación con el microcontrolador es a través de la interfaz SPI. Para obtener el registro de fecha y hora se utilizó módulo RTC que incorpora una batería que permite mantener el valor de tiempo en caso de pérdida de señal. La comunicación es por medio del bus I2C, para obtener los datos que se midieron de manera simple. Para visualizar el status del sistema y los datos medidos se integró una pantalla LCD modelo 1602 que cuenta con 2 líneas por 16 caracteres, para reducir el número de pines se conectó a una Interfax de conversión I2C, que solo se requiere dos conexiones de datos y alimentación de 5VDC, cuenta con un potenciómetro ajustable el cual regula el brillo del módulo.

Cuadro 1. Características de los sensores y componentes utilizados en el sistema de monitoreo para un cultivo de lechugas en hidroponía (Autor principal).

Sensor/Componente	Marca	Modelo	Rango de operación
Temperatura y humedad	ASAIR	DHT22	-40°C a 80°C 0 a 100% de RH
Radiación (LightScout)	PAR SPECTRUM	LS3668I	0 a 2500 $\mu\text{Mol}/\text{m}^2\text{s}$
Datalogger	NOVUS	AA	amplifica 0-50Mv
pH	OMEGA	Phe-1304	0 a 14
Conductividad Eléctrica	DEAGON	ES-2	0 a 120 dS/m
Temperatura del cultivo	DEVICE MELEXIS	MLX90614	-70°C a 380°C
Microcontrolador	ARDUINO	Mega2560	
Reloj en tiempo real (RTC)	MV ELECTRONICA	DS1302	
Módulo MicroSD	Haitronic	HR0104	

Etapa 3. Diseño y construcción del sistema de monitoreo de variables ambientales.

Para el diseño del sistema de monitoreo de variables ambientales se tomó en cuenta el uso de sensores confiables y que además resistieran las condiciones ambientales dentro de un invernadero, así mismo que fuera un diseño simple y de bajo costo. El prototipo propuesto cuenta con subsistemas: alimentación, almacenamiento, comunicación con los sensores y visualización en la pantalla. Un esquema general se presenta en la figura 1.

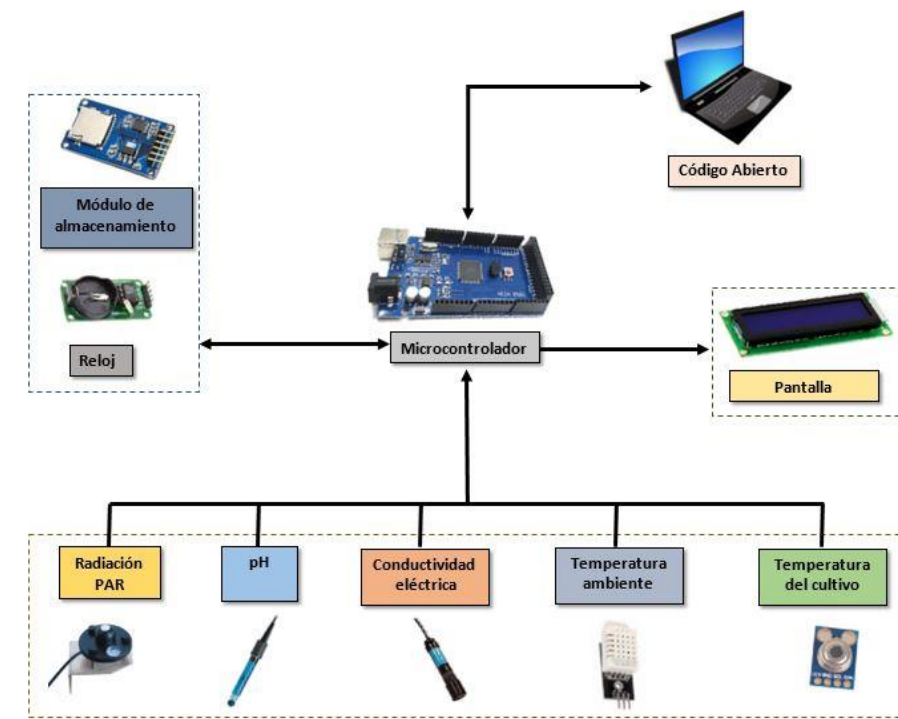


Figura 1. Diagrama general del sistema de monitoreo de variables ambientales.

La alimentación de energía es la encargada de proporcionar el voltaje requerido a los sensores y módulos que incorporan el sistema. Como la mayoría de los componentes se alimenta del voltaje proporcionado por el microcontrolador (3.3-5V) y éste a su vez se alimenta con un voltaje de entrada de 5-20V, se utilizó una fuente de 12 VCD como entrada, colocando un regulador de voltaje LM7809 para optimizar el sistema de funcionamiento de la tarjeta de programación y alimentación de cada uno de los módulos y sensores, realizando la conexión en el puerto GND y VIN del Arduino Mega. La conexión del sistema de almacenamiento se realizó a través de la comunicación SPI que se identifican como miso, mosi, sck y ss que corresponden a los pines 50, 51, 52, 53 respectivamente.

La conexión del reloj RTC se realizó a través de la interfaz I2C que corresponde a rst, dat, clk y fueron identificados con los pines 7,8,9 de la tarjeta de programación.

Para comunicar el microcontrolador con los sensores se utilizaron conectores Jack de 3.5 mm con 3 polos y para los sensores de 4 polos se utilizó una conexión USB, siendo dispositivos de conexión fiables por su uso en electrónica. Los cinco sensores se conectaron a un circuito externo, que comprende de una extensión de cable de comunicación con un largo de dos metros y para tener una conexión con el Jack se colocó un plug de 3.5 mm. El MLX90614 tuvo una conexión USB por tener 4 polos de comunicación. El sensor LS3668l cuenta con 3 conexiones al sistema, uno al pin analógico A1, uno a 5V y una a GND; el sensor ES-2 tiene 3 polos de comunicación, uno al pin digital 2, 5V y GND; el sensor Phe-1304 tiene 3 polos de comunicación, pin analógico A0, 5V y GND; el sensor DTH22 tiene 3 polos de comunicación, pin digital 6, 5V y GND; y el sensor MLX90614 tiene 4 polos de comunicación, SDA, SCL, 5V y GND.

La pantalla LCD cuenta con 16 pines, reduciendo su conexión con un módulo convertidor I2C para utilizar cuatro pines, dos de alimentación y dos en las conexiones SDA y SCL que corresponden a los pines 20 y 21. Se colocaron dos leds de alerta para determinar el encendido del sistema (rojo) y la medición de las variables (azul). A ambos leds se les colocó una resistencia de 1k, el led azul utilizó el pin digital 3, mientras que el led rojo se conectó en la alimentación. Se instaló un botón de reinicio, el cual utiliza el pin reset. La ubicación de los subsistemas se puede observar en la figura 2.

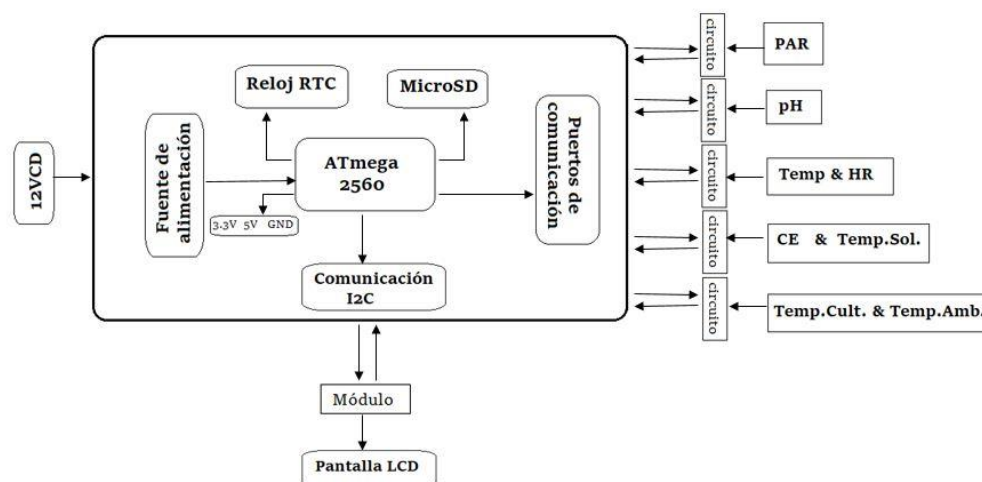


Figura 2. Subsistemas que componen el prototipo de monitoreo.

Se desarrolló un circuito impreso en una placa fenólica de dimensiones 8.95 x 13.00 cm, en donde se ubicó la tarjeta de programación interconectada con el sistema de alimentación, almacenamiento, pantalla LCD, leds de alerta, y entradas de los sensores. En la figura 3 se muestra la conexión final de los componentes con el microcontrolador.

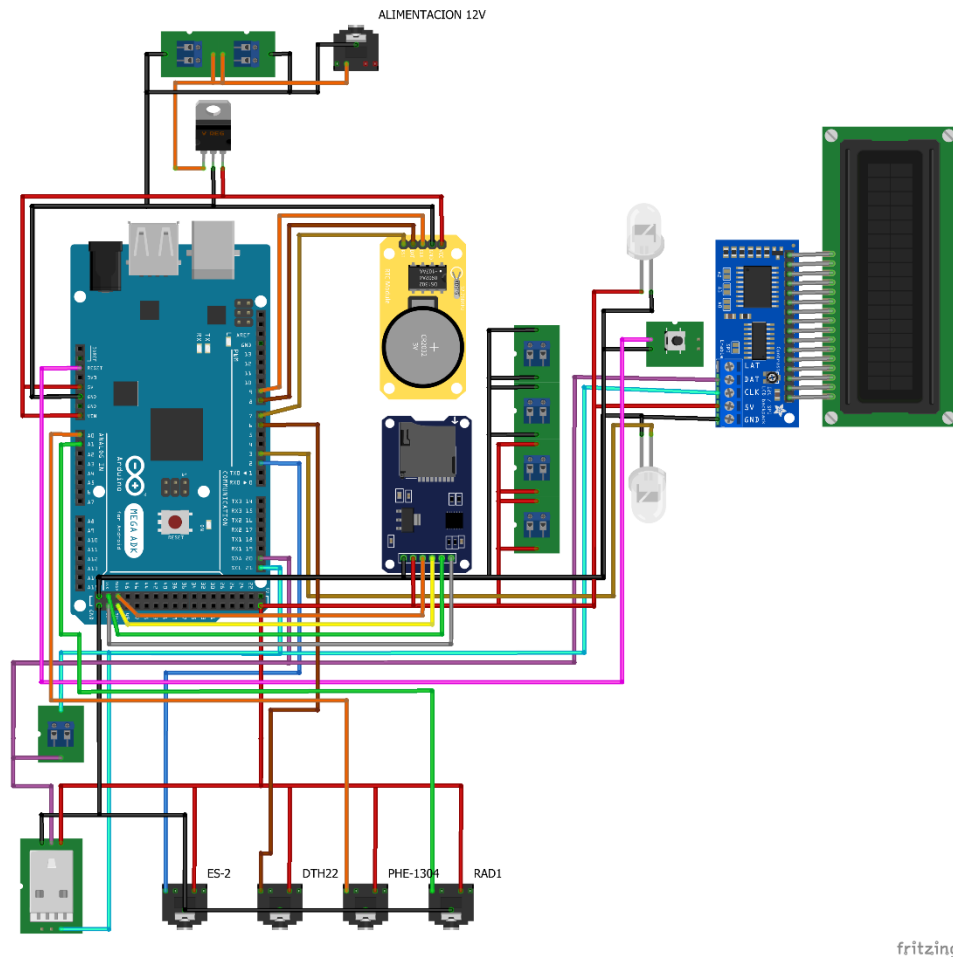


Figura 3. Conexión de los componentes que integran el sistema en el microcontrolador.

Etapas 4. Programación

Se desarrolló el programa sobre el software Arduino, IDE versión 1.8.9 de código abierto, en un entorno de programación basado en lenguaje C/C++. El sistema se dividió en tres subsistemas, almacenamiento de datos, lectura de los sensores, visualización de los datos en la pantalla LCD. El funcionamiento del programa se muestra en la figura 4.

a) Almacenamiento de datos

Para la configuración del RTC, se fijó la fecha con el formato dd/mm/aaaa (día, mes, año) y con horario HH/MM/SS (hora, minuto, segundo). La memoria de almacenamiento SD se inserta en el módulo MicroSD, el programa envía una

señal de lectura y al ser identificada por primera vez, crea un archivo llamado “datos.txt”, en donde se almacenan los registros medidos; en el caso de que la memoria se haya insertado anteriormente, el programa identifica el archivo ya creado y sobrescribe los datos en el archivo identificado. Si la memoria de almacenamiento tiene problemas al ser identificada, manda una señal errónea, solicitando que se introduzca nuevamente la tarjeta hasta que sea reconocida. Se hace la lectura de los sensores en el tiempo programado y si la medición es correcta, se guardan los datos en el archivo creado dentro de la tarjeta SD y continua con el procedimiento.

b) Lectura de los sensores

Se programó un tiempo de registro de datos de las variables ambientales cada cinco minutos, realizando las lecturas de los sensores distribuidos en el tiempo indicado. La lectura del sensor DTH22 se realizó con la librería DTH.h, haciendo compatible la lectura del sensor y el microcontrolador. El programa colocó un valor inicial de cero (0) a la medición del sensor; tomando en cuenta el tiempo de respuesta, se realizó una medición cada dos segundos, obteniendo un total de 10 mediciones; con los valores obtenidos se realizó un promedio y se registró el dato final en el archivo de la memoria de almacenamiento. La lectura del sensor PHE-1304 se realizó a través de un puerto analógico del microcontrolador, generando un valor de 0-5V, se colocó el modelo matemático de funcionamiento del sensor (ecuación 1), realizando las conversiones de voltaje a valores de pH entre 0-14, que se obtuvo realizando la calibración con las soluciones buffer de 4, 7 y 10.

El programa colocó un valor inicial de cero a la medición del sensor; se identificó el tiempo de respuesta del sensor, realizando una medición cada 4 segundos, obteniendo un total de 55 mediciones; se realizó un promedio con los valores obtenidos y se registró el resultado en el archivo de la memoria SD.

$$pH = (-0.0313 * promedio) + 32.533 \quad (1)$$

El sensor ES-2 utilizó el protocolo de comunicación SDI-12 (Serial Data Interface at 1200 baud) dando lectura a instrumentos de baja potencia. Se conectó a través de un puerto digital del microcontrolador; el programa colocó un valor inicial de cero (0) a la medición del sensor; el tiempo de respuesta del sensor es de 300 milisegundos, se realizó una medición cada 500 milisegundos, obteniendo un total de 40 mediciones; con los valores obtenidos se realizó un promedio y se registró el dato final en el archivo de la memoria de almacenamiento. La calibración del sensor viene dada por el fabricante, sin embargo, se realizó la comprobación con un conductivímetro portátil marca HANNA modelo HI8734 de medición manual, el cual además de medir la conductividad eléctrica, proporciona mediciones de temperatura de la solución y pH. El MLX90614 proporciona como valor la temperatura del dosel del cultivo y la temperatura ambiental. El microcontrolador se comunica con el sensor mediante el protocolo de comunicaciones I2C para emitir la medición de manera digital. El programa colocó un valor inicial de cero a la medición del sensor; tomando en cuenta el tiempo de respuesta se realizó una medición cada 20 milisegundos, obteniendo un total de 40 mediciones; se realizó un promedio con los valores obtenidos y se registró el resultado en el archivo de la memoria SD.

c) Visualización de datos en pantalla LCD

La sucesión de impresión en la pantalla LCD se realizó conforme a la programación del sistema. Al inicio del programa se identifica la tarjeta de almacenamiento, imprimiendo un mensaje de “BUSCANDO SD” con duración de 2 segundos; al ser identificada continua el programa, por el contrario, envía un mensaje “INSERTA SD” visualizado por 10 segundos, dando tiempo a que sea insertada. Cuando se identifique la tarjeta, el sistema continúa. Se coloca “PREPARANDO EL SISTEMA” durante 5 segundos; los sensores se encuentran conectados y el programa imprime “LECTURA DE SENSORES” durante 5 segundos y da inicio a la medición, visualizando “MIDIENDO VARIABLES”. Durante este proceso, el sistema se encuentra realizando la medición de cada uno de los sensores con el número de datos requeridos.

Al concluir la medición de variables, el sistema guarda los datos medidos en el formato creado, mandando un mensaje "REGISTRANDO DATOS" para próximamente visualizar los datos guardados de cada uno de los sensores en la pantalla. En los bloques de visualización de datos se coloca un mensaje del dato medido con el parámetro y la unidad de medida con una duración de 5 segundos cada uno, quedando de la siguiente forma, "TEMP (C): dato", "HR (%): dato"; "PH: dato", "T (C) Sol: dato"; "CE (Ms/cm): dato"; "TCult (C): dato", "Tambt (C): dato", "RadPAR (mM/ m²/s): dato".

Para la adquisición de datos se programó que al mandar en el serial la letra "A" en el serial de la computadora, el sistema automáticamente imprime los valores que se encontraban guardados en el archivo de almacenamiento.

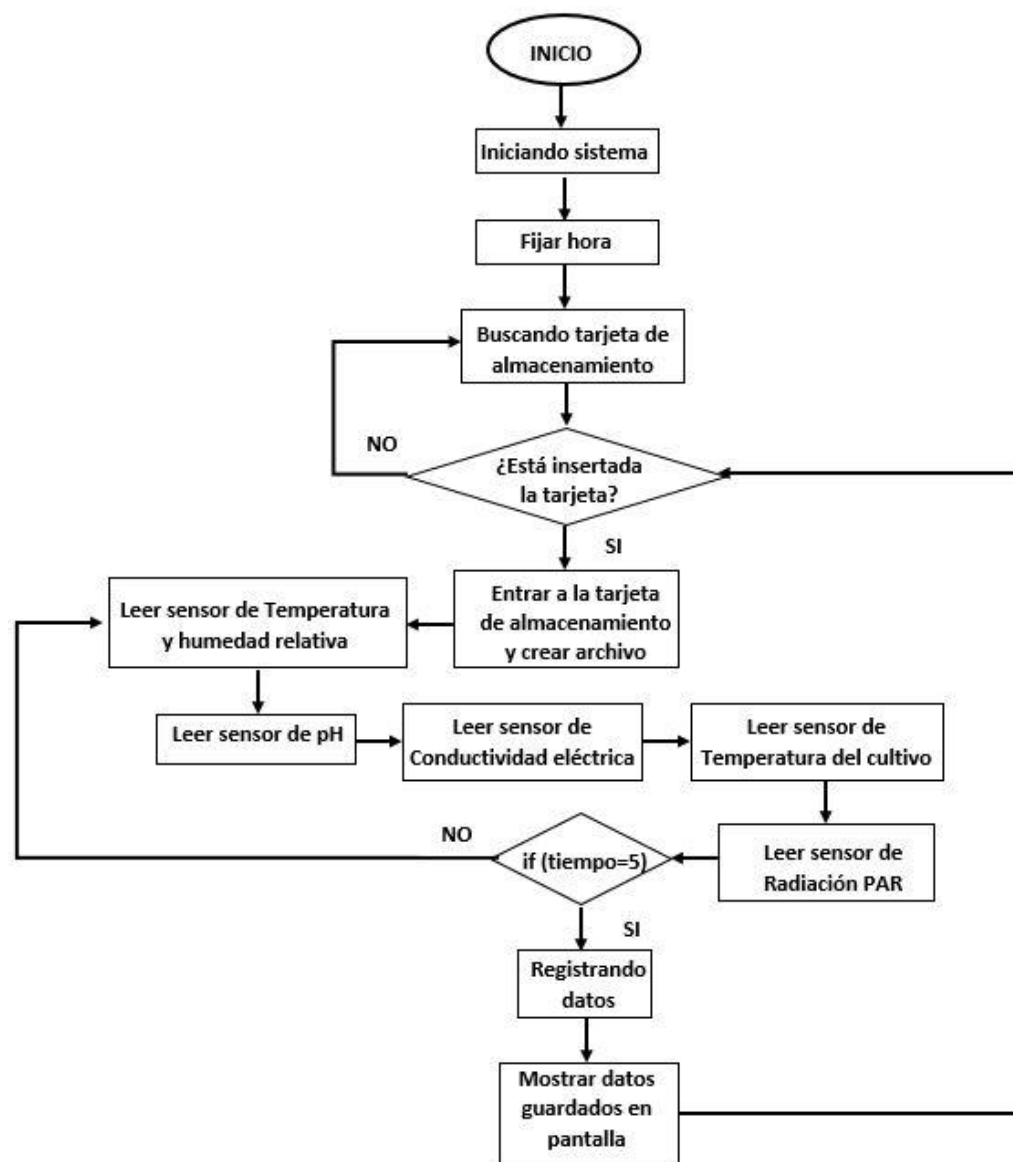


Figura 4. Programación de los sistemas integrados en el monitoreo de las variables ambientales.

Etapa 4. Distribución del sistema y prueba de funcionamiento

La prueba de funcionamiento del sistema se realizó en un invernadero tipo capilla del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado en el Campo Agrícola Experimental “Tlapeaxco”, en el municipio de Texcoco, Estado de México, localizado a 19° 29’06” latitud norte, 98° 53’09” longitud oeste, a una altitud de 2260 msnm.

Se produjeron 200 lechugas hidropónicas en un sistema de balsas flotantes. Se construyó un depósito con dimensiones de 2.4 x 4.8 x 0.30 metros, colocando como soporte para las plantas 4 placas de poliestireno expandido con dimensiones de 1.2 x 2.4 x 0.05 metros, se perforaron orificios de 2 pulgadas a una distancia de 16 cm entre cada uno, con un arreglo de plantación a marco real. Para la nutrición de las plantas se preparó una solución nutritiva STEINER al 50 % por considerarse un cultivo de hoja. Se colocaron 100 plántulas de lechuga tipo italiana y 100 tipo Romana variedad Climax.

El sistema general se situó a un costado del depósito de las lechugas hidropónicas centrado dentro de una caja de metal para su seguridad. El DTH22 se colocó dentro de un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 50 cm de largo, forrado de aluminio con la finalidad de reflejar las ondas de radiación, en una de las entradas del tubo se puso un extractor de 12V para mantener una temperatura constante dentro del tubo y evitar ruidos en el sensor, se ubicó el tubo de forma horizontal con dirección norte sur, centrado sobre el cultivo a una altura de 80 cm. El sensor LS3668I se colocó a un costado del depósito del cultivo, a una altura de 1.5 metros sobre el suelo y centrado, para ubicarlo se tomó en cuenta un sitio en donde no existiera presencia de sombras de algún objeto y que se mantuviera en planicie. El sensor MLX90614 se colocó dentro de un objeto cóncavo de manera que solo se viera el lente y se recubrió con silicona. Se ubicó en una planta céntrica del cultivo a una distancia sensor-planta de 1 cm. El Phe-1304 y ES-2 se colocaron en el interior de la solución nutritiva, centrado en el cultivo. En la figura 5 se puede observar la distribución del sistema de monitoreo de variables ambientales en el sistema de producción.

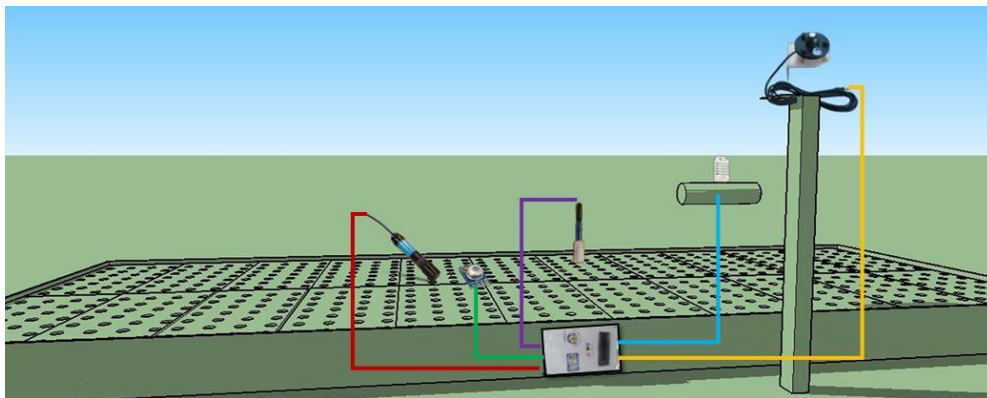


Figura 5. Distribución del sistema de monitoreo de variables ambientales en el sistema de producción de balsas flotantes.

3.4 Discusión y resultados

La prueba de funcionamiento del sistema de monitoreo se desarrolló en el mes de julio-agosto implementando un cultivo de lechuga hidropónica en el sistema de balsa flotante. El tiempo de monitoreo fue de 28 días evaluando el comportamiento de cada uno de los sensores. En la figura 6 se observa la distribución de los instrumentos de medición en el cultivo de prueba.

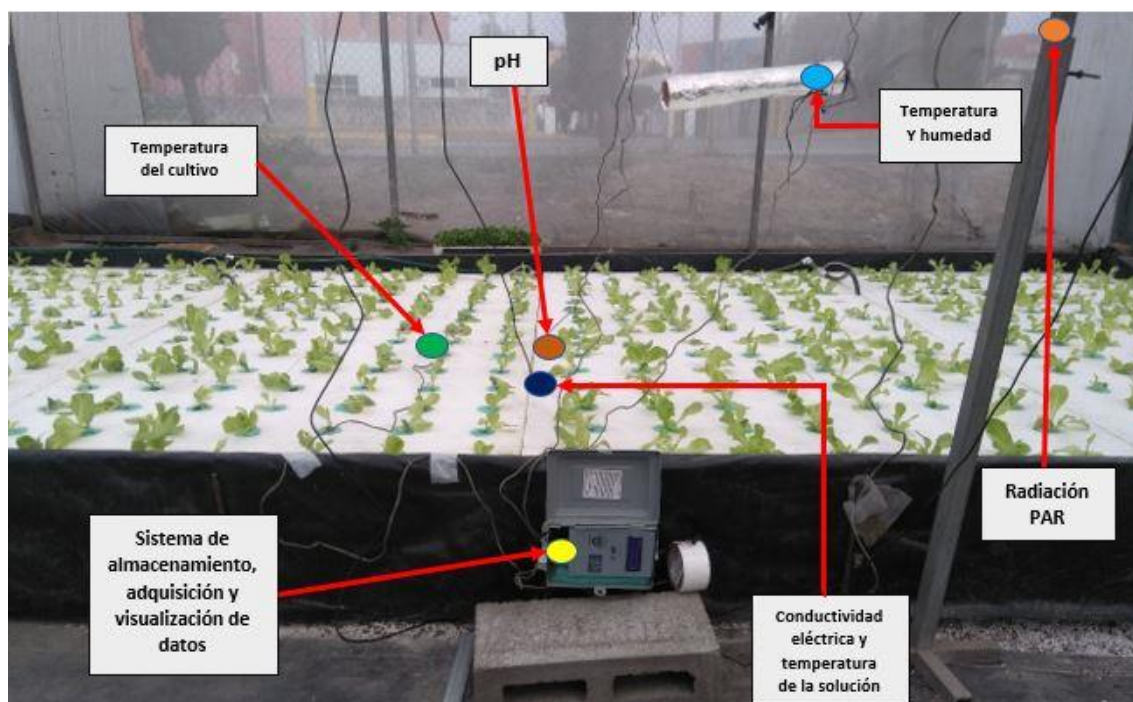


Figura 6. Sistema de monitoreo de variables ambientales distribuido en el cultivo de prueba.

Se hicieron 5 mediciones de cada una de las variables ambientales con instrumentación manual, observando que en los 11 m^2 de producción de lechuga hidropónica la variación de las medidas era prácticamente nula, optando por colocar los sensores en el centro del sistema de producción. La medición programada del sistema fue de 5 minutos, sin embargo, para mostrar la funcionalidad del sistema en el ciclo de crecimiento de la lechuga, se colocaron los valores medidos por cada hora.

En la figura 7 se muestra el comportamiento del sensor de temperatura DTH22 en el ciclo del cultivo de la lechuga hidropónica.

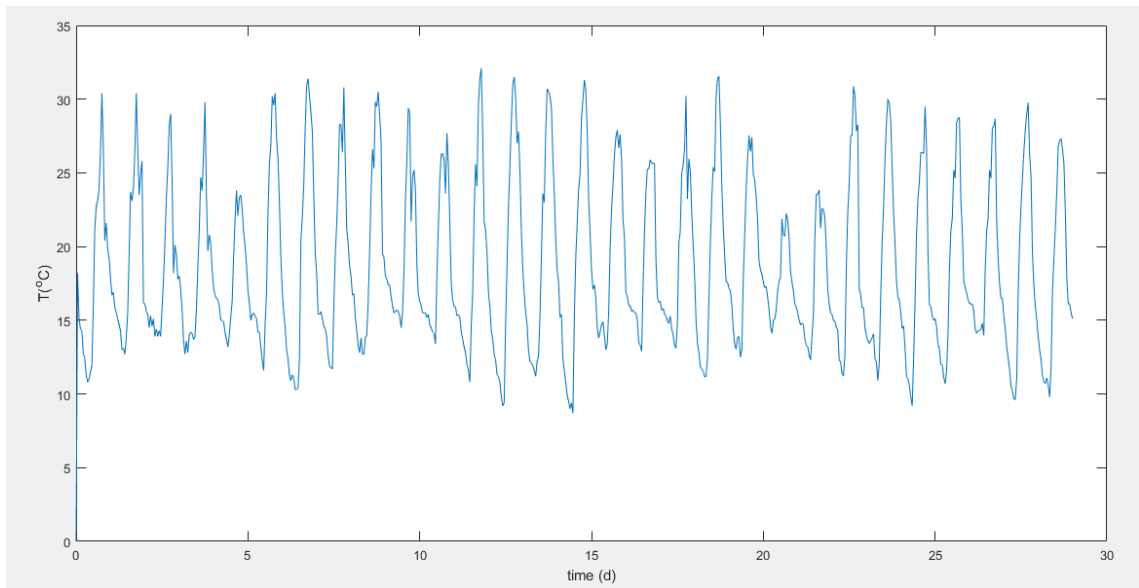


Figura 7. Datos obtenidos de la temperatura ambiente del invernadero en el sistema de producción de lechuga hidropónica.

La temperatura mínima fue de 8.7 °C, la máxima de 32.1 °C, la media de 18.6 °C. El cultivo de lechuga en condiciones de invernadero para su crecimiento requiere una temperatura óptima de 18 a 23 °C, y las temperaturas registradas por el equipo se encuentran dentro del rango.

En la figura 8 se observa el comportamiento del sensor MLX90614 en una planta de lechuga localizada en el centro del sistema de producción.

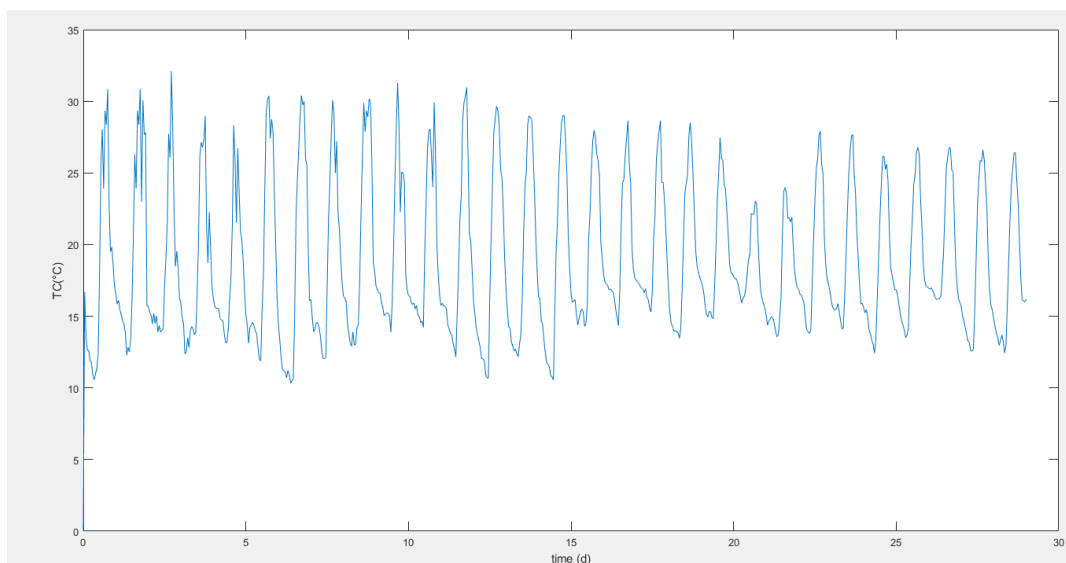


Figura 8. Datos obtenidos de la temperatura de la hoja de la planta en el sistema de producción.

La temperatura mínima de la hoja fue de 9.8 °C, la máxima de 40.79 °C, la media de 18.8 °C. la temperatura alta se debió a la apertura tardía de las cortinas del invernadero, sin embargo, para reducir éstos efectos se colocaron 4 extractores de aire caliente en el invernadero para disminuir la temperatura.

Para medir la radiación PAR se utilizó el sensor LS3668I, obteniendo los siguientes datos mostrados en la figura 9.

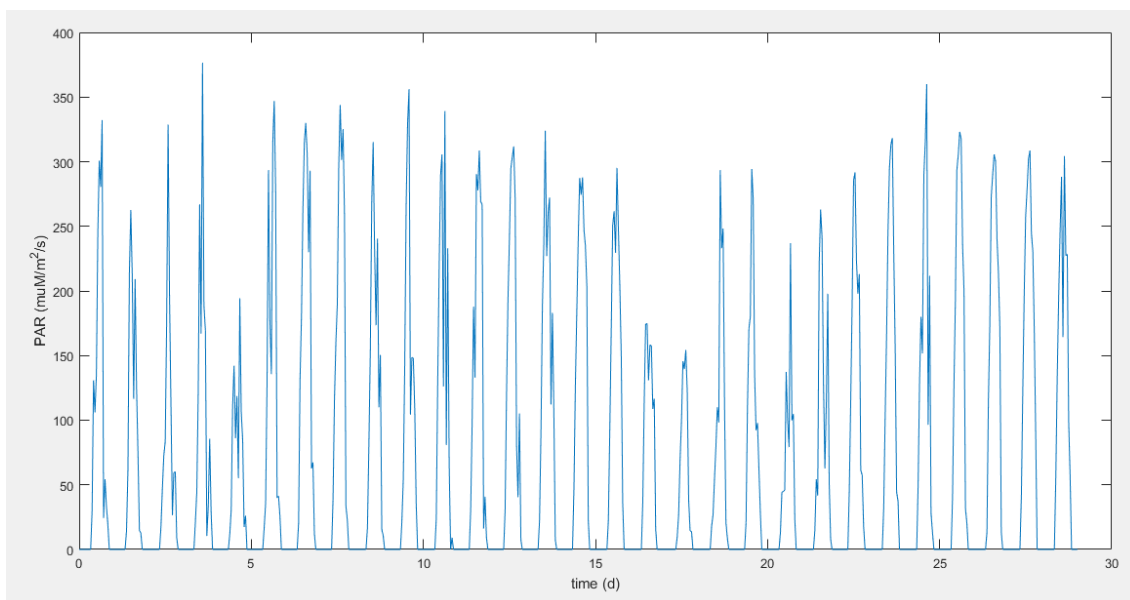


Figura 9. Datos de la radiación PAR obtenida durante la producción de lechuga hidropónica en el invernadero.

El sensor LS3668I se colocó en una zona en donde no existiera interferencia con sombras, pero durante la noche existían mediciones con valores menores a $15 \frac{mM}{m^2}/s$, esto se debió a una lámpara ubicada sobre el camino en donde se encuentra el invernadero. Se colocaron todos los valores menores de 15 a 0, obteniendo 0 como el valor mínimo; el valor máximo fue de $376.5 \frac{mM}{m^2}/s$ y una media de $70.62 \frac{mM}{m^2}/s$.

En la figura 10, figura 11 se observan los datos obtenidos del sensor ES-2 que mide conductividad eléctrica y temperatura de la solución nutritiva.

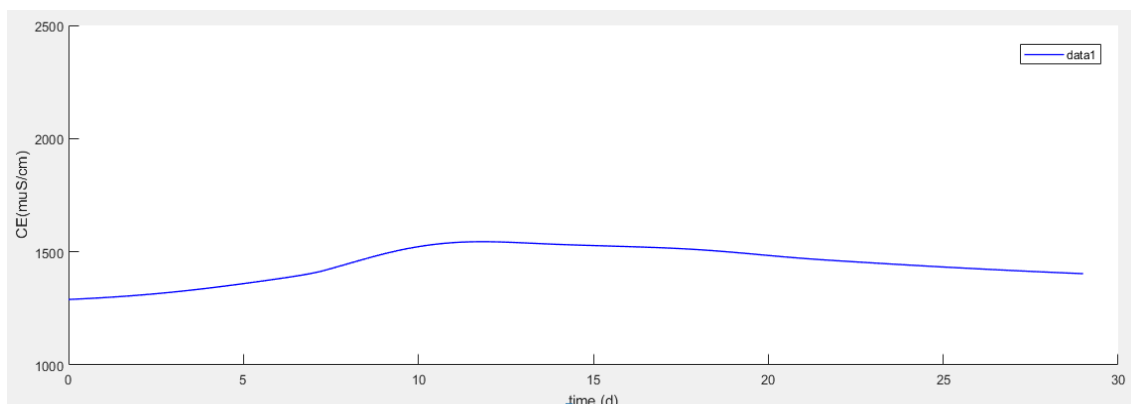


Figura 10. Datos obtenidos de la conductividad eléctrica en el sistema de producción de lechuga hidropónica dentro del invernadero.

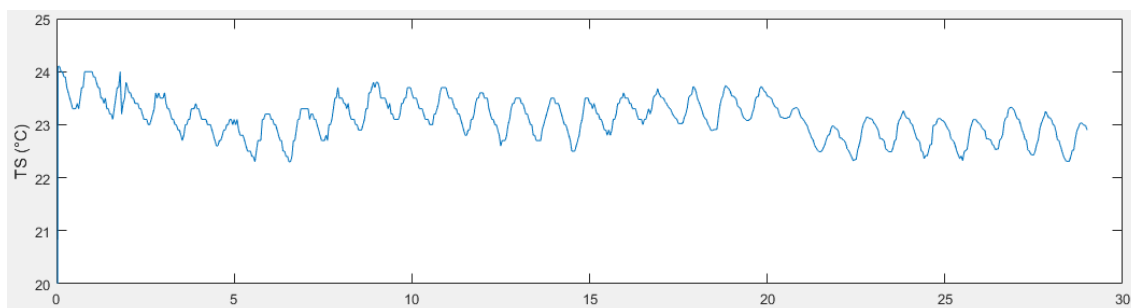


Figura 11. Datos obtenidos de la temperatura de la solución nutritiva en el sistema de producción de lechuga hidropónica dentro del invernadero

Al inicio los valores de la conductividad eléctrica y temperatura de la solución nutritiva variaban en las 10 mediciones iniciales que se programaron en el sistema, Se realizaron más pruebas y logrando una estabilidad al hacer 40 mediciones. Se obtuvo una medida media de conductividad eléctrica de 1.45 dS/m , por lo que para un cultivo de lechuga se requiere no tener una conductividad eléctrica mayor de 1.5 dS/m . La temperatura de la solución nutritiva obtuvo un valor promedio de 23°C , estando en una temperatura ideal para la que la planta tenga una buena absorción de nutrientes.

En la figura 12 se observa el comportamiento de la sonda Phe-1304 mostrando los valores de pH obtenidos en la producción de lechuga.

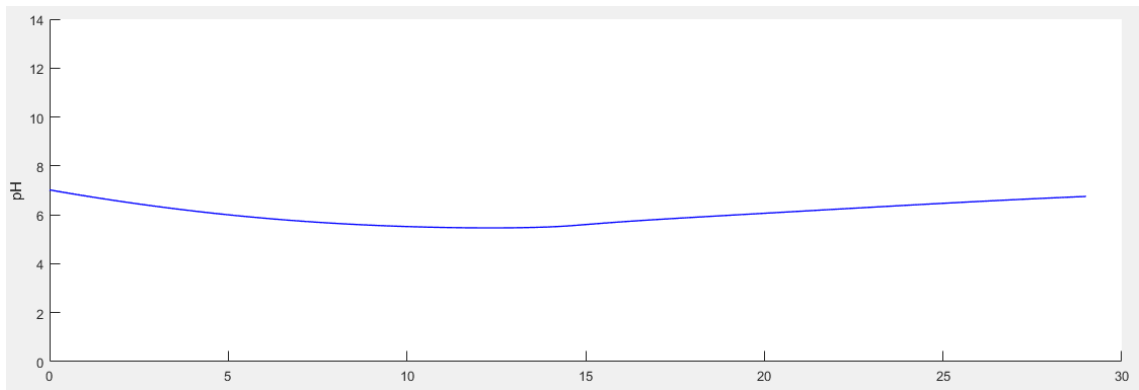


Figura 12. Valores de pH obtenidos en la solución nutritiva del sistema de producción de lechuga hidropónica.

El sensor de pH fue uno de los instrumentos difíciles de obtener medidas, ya que para poder generar buenos valores se tiene que realizar una excelente calibración. De igual manera que el sensor ES-2, los valores variaron en las 10 mediciones iniciales que se programaron en el sistema, al realizar 40 mediciones se podía obtener una estabilidad en los valores, por lo que se colocaron 55 mediciones para obtener más precisión. Para cultivos hidropónicos de debe tener un pH dentro del rango de 5.5-6.5, obteniendo en el sistema de producción un valor medio de 6. Se realizó la medición del pH con la instrumentación HANNA, demostrando el funcionamiento del sensor con mediciones correctas (Figura 13).



Figura 13. Medición de la variable pH en la solución nutritiva del sistema de producción de lechuga hidropónica con la instrumentación HANNA.

En la figura 14 se puede observar el crecimiento de la lechuga durante su desarrollo a diferentes días después del trasplante (ddt)



Figura 14. Crecimiento de la lechuga tipo Mantequilla en las diferentes etapas de muestreo.

Durante los primeros 8 ddt la plántula estuvo en un periodo de adaptación en el sistema hidropónico, asimilando la solución nutritiva desarrollando raíces rápidamente. De los 11 a 20 ddt la lechuga entró en una etapa precoz en su desarrollo, formando mayormente hojas. Después de los 25 ddt el crecimiento de la lechuga fue menor, y el espacio de crecimiento a reducirse, haciendo una competencia en asimilación de radiación entre ellas, la distribución de un cultivo de lechugas en la etapa de maduración (25 ddt) se puede observar en la figura 15.



Figura 15. Producción de lechuga hidropónica en un sistema de balsas flotantes en etapa de maduración.

3.5 Conclusiones

Se presentó un sistema de medición de variables ambientales en una modalidad de producción hidropónica de lechugas en balsas flotantes. El sistema de monitoreo permite la adquisición de datos de las variables: temperatura del aire, humedad relativa, temperatura del cultivo, radiación solar fotosintéticamente activa, conductividad eléctrica, temperatura de la solución y pH.

Al realizar la prueba de campo en un ambiente real, este funcionó correctamente generando mediciones confiables, lo que demostró ser eficaz, robusto y preciso para proporcionar los rendimientos y disminuir el impacto ambiental. Se considera que el prototipo cuenta con una gran aceptación para implementarse en sistemas de producción de pequeños y medianos productores por las características que lo identifican y el bajo costo.

3.6 Recomendaciones

Para mejorar el presente trabajo de investigación se recomienda continuar con el sistema de adquisición de datos, ya que se visualiza que la obtención sea través de una plataforma creando una interfaz con acceso remoto, porque hasta el momento la adquisición de datos se realiza por medio de un cable USB.

3.7 Referencias

- Alarcón, Á. H., Arias, G., Díaz, C. J., y Sotto J. D. (2018). Sistema de control automático de variables climáticas para optimizar el rendimiento de cultivos bajo cubierta. *Revista Ingeniería Solidaria*. 14 (24), 0-11. doi: 10.16925/in.v14i24.2158
- Arboleda, A., Cortes, O., y Zapata, C. (2011). Sistema de instrumentación y monitoreo para el invernadero la Aldana de la Universidad del Quindío. *Scientia et Technica*. 16 (49), 219-225.
- Arias, G., Alarcón, Á. H., Díaz, C. J., y Sotto J. D. (2018). Sistema de control automático de variables climáticas para optimizar el rendimiento de cultivos bajo cubierta. *Revista Ingeniería Solidaria*. 14 (24), 0-11. doi: 10.16925/in.v14i24.2158
- Aristizábal, A.J. (2016). Diseño e implementación de una estación de monitoreo automático para medir humedad relativa, temperatura ambiente y luz incidente en invernaderos, usando instrumentación visual. *Revista Colombiana de Física*., 2-6. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/275024715>
- Domingues, D. S., Takahashi, H. W., Camara, C. A. P., y Nixdorf, S. L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and*

Electronics in Agriculture. 84 (12), 53-61. doi: 10.1016/j.compag.2012.02.006

- Fisher, D. K. (2007). Automated collection of soil-moisture data with a low-cost microcontroller circuit. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 23 (4), 493-500.
- Fletes, N., Paredes, C., y Vaca, J. (2017). Diseño e implementación de un prototipo de automatización y control sustentable para invernadero. *Revista de Prototipos Tecnológicos*. 3 (10), 1-10.
- Flores, A., y Ortega, A. (2015). Sistema de instrumentación eficiente para cultivos de producción controlada a través de un sistema de gestión rentable. *Jóvenes Investigadores*. 1 (3), 31-35.
- Gómez, J. C., Rodríguez, D., y Díaz, J. (2018). Sistema de control de riego con funciones de monitoreo para cultivos hidropónicos basado en el método de bandeja de demanda irrigación. *Pistas Educativas*. 40 (130), 117-131. Recuperado de: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- Groener, B., Knopp, N., Korgan, K., Perry, R., Romero, J., Smith, K., Stainback, A., Strzelczyk, A., y Henriques, J. (2015). Preliminary design of a Low-Cost greenhouse with open source control systems. *Procedia Engineering*. 107 (15), 470-479. doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.105
- Lugo, O., Villavicencio, G., y Díaz, S. (2013). Paquete tecnológico para el monitoreo ambiental en invernaderos con el uso de hardware y software libre. *Terra Latinoamericana*. 32 (1), 77-84.
- Martinez, F., y Garcés, G. (2010). Growth and production of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. romana) under different levels of potassium. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 4 (2), 185-198.
- Molina, J., Martín, B., Vázquez, S., y Sánchez, F. (2010). *Desarrollo de un sistema de adquisición de datos climáticos para un invernadero*. Promise (Presidencia). 12th International Conference on Project Engineering. Ciudad Real, España.
- Morales, E. R., Inzunza, E., López, R. M., Cardoza, L., García, E. E., Olguín, J. E., y Hernández, J. M. (2012). *Sistema de supervisión de temperatura de un invernadero mediante una comunicación inalámbrica*. (Informe). Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. México.

- Moreno, E., Sánchez, F., Gutiérrez, J., González, L., y Pineda, J. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 21 (1), 43-55. doi: 10.5154/r.rchsh.2013.12.047
- Ponce, P., Molina, A., y Mata, O. (2017). Controladores inteligentes para invernadero hidropónico. *Research in computing science*. 135 (1), 99-114.
- Rincón, P., Silva, J., y Torres, A. (2016). Automatización de invernadero para producción agrícola con tecnología de punta a bajo costo. *Revista de Investigaciones Agro empresariales*. 3 (1), 5-8.
- Roca, D., y Florian, P. (2007). Un nuevo sistema de gestión integral automática de cultivos en invernaderos hidropónicos. In *Vida Rural*. Vol. 1, pp. 40-42.
- Rodríguez, M., Chagolla, H., y López, M. (2004). Diseño conceptual de sistema para la automatización del invernadero. (Informe). Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica del Sureste de Guanajuato. México.
- Steidle, A., Zolnier, S., y Carvalho, D. (2014). Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 103 (1), 17-25. doi: 10.1016/j.compag.2014.02.001
- Van Beveren, P. J. M., Bontsema, J., Van Straten, G., y Van Henten, E. J. (2015). Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied Energy*. 159 (2), 509-519. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.012
- Wang, Z., Wang, K., Yang, F., Pan, S., Han, Y., y Zhao, X. (2018). Image enhancement for crop trait information acquisition system. *Environmental and Experimental Botany*. 153 (5), 63-71. doi: 10.1016/j.envexpbot.2018.05.010
- Yeh, Y. F., Lai, T., Liu, T., Liu, C., Chung, W., y Lin, T. (2013). An automated growth measurement system for leafy vegetables. *Biosystems Engineering*. 117 (1), 43-50. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.08.011
- Zhah, H., y Ching, H. (2016). Application of integrated control strategy and bluetooth for irrigating romaine lettuce in greenhouse. *International Federation of Automatic Control*. 49 (16), 381-386. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.070

4 Sensibilidad global y calibración de un modelo dinámico de crecimiento y absorción de nitrógeno para lechuga

4.1 Resumen

La lechuga es una de las hortalizas de hoja más consumidas a nivel mundial. La producción de este vegetal ha ido en aumento para satisfacer a la demanda de alimentos que exige el incremento de la población en los últimos años. El cultivo en invernadero se ha complementado con sistemas hidropónicos, principalmente en balsas flotantes, que han logrado producciones durante todo el año, teniendo un mejor control del sistema y permitiendo optimizar el uso eficiente de recurso hídrico y fertilizantes. Sin embargo, uno de los problemas en las hortalizas de hoja en producción de invernadero, es la acumulación de nitratos en las plantas que, al ser consumida con un alto contenido y transformarse en nitritos en el cuerpo humano, pueden aumentar el riesgo a ciertas formas de cáncer. Para ello se buscan métodos para producir un cultivo que permita maximizar los rendimientos y además asegurar la calidad de los productos. La disponibilidad de un modelo permite desarrollar una estrategia óptima para la producción de lechuga en invernadero. Los objetivos de la investigación son a) evaluar un modelo dinámico del crecimiento y la calidad de la lechuga hidropónica que permita predecir la acumulación de biomasa y concentración de nitrógeno, en Chapingo, México, considerando la variedad de lechuga Romana y Mantequilla, b) Desarrollar un análisis de sensibilidad local para identificar los parámetros más excluyentes durante la producción, c) calibrar los parámetros más influyentes.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., invernadero, hidroponía, biomasa, nitrato.

4.2 Introducción

Los avances tecnológicos han permitido transformar una simple producción hortícola a fábricas de alta tecnología que optimizan la productividad de las plantas, el trabajo humano y el consumo de recursos (Viršilė, *et al.*, 2019). La posibilidad de medir con precisión las variables ambientales y el suministro de nutrientes ha permitido que se produzcan vegetales durante todo el año, así como la oportunidad de controlar la productividad y la calidad de la planta (Liu *et al.*, 2014; Viršilė *et al.*, 2019). En los últimos años, el uso de sistemas de cultivo ha crecido en importancia de la producción vegetal por obtener vegetales de hoja limpios y seguros. Un sistema de balsas flotantes, es particularmente apropiado para la producción de hortalizas de hoja como la lechuga que, permiten el uso eficiente de fertilizantes y la corrección rápida de deficiencias nutricionales y el control de importantes compuestos anti nutricionales como los nitratos (Moreno *et al.*, 2015; Giménez *et al.*, 2019).

El nitrógeno es un macronutriente esencial que afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas (Bian *et al.*, 2018; Lan *et al.*, 2020). Los nitratos (NO_3^-) son componentes naturales en todos los tejidos vegetales y son esenciales para su crecimiento y desarrollo normal (Bahadoran *et al.*, 2016; Campanella *et al.*, 2017), constituye la forma más importante de nitrógeno (N) absorbido fácilmente en grandes cantidades por la mayoría de los cultivos hortícolas para lograr rendimientos máximos (Colla *et al.*, 2018). Cuando la absorción de nitrato excede por mucho la asimilación por parte de la planta, puede ocurrir acumulación de nitrato en los tejidos (Colla *et al.*, 2018; Pérez *et al.*, 2019). Particularmente, el problema del alto contenido de nitrato ocurre comúnmente en vegetales cultivados en invernaderos y fábricas de plantas (Fu *et al.*, 2017).

Para el nitrato, la absorción es predominante a través de las hortalizas, en particular las hojas verdes, que tienden a acumular concentraciones más altas en sus hojas en comparación con los bulbos, frutos, raíces, semillas y tubérculos (Kyriacou *et al.*, 2019; Bahadoran *et al.*, 2016).

La lechuga es un hiperacumulador de nitratos que en el cuerpo humano al transformarse en nitritos y al reaccionan con aminos y amidas, producen compuestos N-nitrosos que pueden aumentar el riesgo de ciertas formas de cáncer (Bian *et al.*, 2018; Colla *et al.*, 2018; Kyriacou *et al.*, 2019; Lin *et al.*, 2019; Viršilė *et al.*, 2019).

Los altos niveles de concentración de nitrato en la lechuga son indeseables, por lo que se buscan métodos para producir un cultivo que permita maximizar los beneficios del productor y así mismo asegurar la calidad de los cultivos (López *et al.*, 2003).

La disponibilidad de un modelo de cultivo permite desarrollar una estrategia de control óptima para la producción de lechuga en invernadero; una estrategia que, mientras maximiza las ganancias del productor, también asegurará la calidad del producto (Loslovich y Seginer, 2000). Varios tipos de modelos de lechuga se han desarrollado a lo largo de los años. Los modelos que se centran en la acumulación de carbono (crecimiento) y suponen un suministro de nutrientes no restrictivo (Linker *et al.*, 2004). Se necesitan modelos de simulación precisos para cambios a corto plazo en el crecimiento de cultivos hidropónicos y la absorción de nitrato para la detección rápida de fallas en los sistemas hidropónicos (Mathieu *et al.*, 2006). La precisión de los modelos dinámicos, otorga confiabilidad, principalmente si se requiere controlar las condiciones ambientales de un cultivo dentro de un invernadero (López *et al.*, 2013).

De Graaf *et al.*, (2003) realizaron un control de circuito abierto de efecto invernadero para lograr una concentración específica de nitrato de lechuga utilizando un modelo dinámico propuesto por Seginer *et al.*, (1998) en el que el crecimiento de la lechuga y la acumulación de nitrato está relacionado con la temperatura del aire del invernadero, la concentración de CO₂ y la radiación solar (Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2011).

López *et al.*, (2003) presentó una solución para un nuevo problema de control óptimo en el que el propósito es producir un peso deseable en un tiempo

determinado, con un nivel de nitrato óptimo y con un costo mínimo para la iluminación artificial utilizando el modelo NICOLET. Las entradas de control fueron luz, temperatura y concentración de dióxido de carbono. El modelo tiene dos variables de estado. Utilizando un modelo dinámico de lechuga de dos variables de estado que predice la cantidad de nitrato en el momento de la cosecha, se formula un control óptimo como restricciones terminales.

Zhang *et al.*, (2008) desarrollaron un modelo dinámico mecanicista para predecir la absorción de nitrógeno durante todo el crecimiento para la lechuga cultivada en solución nutritiva bajo diferentes condiciones de luz. El modelo se parametrizó utilizando datos de literatura y se calibró para las diferentes intensidades de luz de tres experimentos realizados. Como resultado se obtuvo una buena predicción de absorción de nitrógeno desde el estado de plántula hasta la madurez de la lechuga.

El objetivo del presente trabajo es modelar la acumulación de biomasa y contenido de nitrógeno en lechugas cultivadas bajo invernadero en un sistema hidropónico de balsas flotantes mediante un modelo dinámico mecanicista en Chapingo, Estado de México, durante septiembre de 2019.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Descripción del experimento

El experimento se realizó durante el otoño de 2019 en el Campo Agrícola Experimental en la Universidad Autónoma Chapingo, que se encuentra en el municipio de Texcoco, Estado de México, con ubicación 19° 29' 06" latitud norte, 98° 53' 09" longitud oeste, a una altitud de 2240 m. Se utilizó un invernadero tipo capilla de 5.70 x 2.40 m, con cubierta de polietileno y ventilación natural.

Las lechugas fueron cultivadas en un sistema de balsa flotante construido de madera de dimensiones 4.80 m de largo, 2.30 m de ancho y 0.30 m de profundidad. El contenedor se forró con polietileno negro calibre 600. Se utilizó semilla de lechuga tipo mantequilla variedad Cortesana M1 las cuales se

sembraron en placas de lana de roca (figura 1). El 6 de septiembre de 2019, cuando las plantas tenían cuatro hojas verdaderas, se trasplantaron en placas de poliestireno, distribuidas en marco real considerando una distancia de 16 cm entre plantas e hileras, obteniendo una densidad de población de 38 plantas por m². Para proporcionar oxígeno a la raíz, se utilizó un sistema conformado por tres tubos Venturi distribuidos en el contenedor y conectado a una bomba de ½ hp que, al accionarse, recirculaba la solución nutritiva e inyectaba aire al contenedor.



Figura 1. a) Plántula de lechuga desarrollada en el sustrato de lana de roca; b) distribución de plántulas por marco real en el sistema de producción hidropónico.

La solución nutritiva que se usó contenía los siguientes nutrimentos (en mg·litro⁻¹): Nitrógeno, 100; Fósforo, 30; Potasio, 120; Calcio, 110; Magnesio, 25; Azufre, 100; Hierro, 1; Manganeso, 0.035; Cobre, 0.01; Zinc, 0.045; y Boro, 0.25. Las fuentes fertilizantes fueron: nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de magnesio, sulfato de potasio, fosfato monopotásico, quelato de fierro, sulfato de manganeso, sulfato de cobre, sulfato de zinc, molibdato sódico, borax, y ácido sulfúrico a 85 %. El pH de la solución se monitoreó diariamente y se ajustó con ácido sulfúrico para mantenerlo entre 5.5 y 6.5 durante el estudio.

4.3.2 Colección de datos

Datos del clima

En el interior del invernadero se instaló un sistema de monitoreo basado en Arduino para medir las variables ambientales y de la solución nutritiva como se describe a continuación. La temperatura del ambiente y humedad relativa con un sensor DTH22 (Asair, EE.UU.) localizada dentro de un protector solar. La temperatura del cultivo con un sensor MLX90614 (Melexis, EE.UU.), que se colocó a 1 cm de distancia sobre una planta cerca del centro de la balsa. La radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) con un sensor LS3668I (Spectrum, EE.UU.), a un costado del depósito del cultivo y a una altura de 1.5 m. La conductividad eléctrica y temperatura de la solución nutritiva con un sensor ES-2 (Decagon Device, EE.UU.), y el pH con un sensor Phe-1304 (Omega, EE.UU.). Estos dos últimos sensores se colocaron dentro de la solución nutritiva, en el centro del cultivo. Las variables se midieron cada 10 s, se promediaron cada cinco minutos y se guardaron en un archivo.

Peso seco, área foliar y contenido de nitrógeno

Los muestreos de biomasa se realizaron a intervalos regulares cada 3-4 días durante el crecimiento del cultivo, separando la biomasa aérea y las raíces. Se seleccionaron 4 y 3 plantas al azar, en el primer y en los siguientes muestreos, respectivamente. El peso fresco de la biomasa aérea se midió con una báscula digital de precisión marca OHAUS modelo Pionner escala PA2102 con capacidad de 2100 g y precisión de 0.01 g.

El área foliar se midió con un medidor de área foliar marca LI-COR (modelo LI-3100). Para medir el área foliar se separaron todas las hojas de la lechuga para después colocarlas en el medidor extendiendo la hoja (figura 4). Después de realizar la medición de área foliar, las hojas se colocaron en bolsas de papel para

secarlas durante 40 h en un horno a una temperatura de 80°C. Una vez alcanzado un peso constante, el peso seco se midió en una báscula digital de 0.01 g de precisión.

La concentración de nitratos en el follaje se determinó en el laboratorio de análisis de suelos del Departamento de Suelos de la UACH. La determinación de nitrógeno en las muestras de lechuga se realizó con el método de MicroKjeldahl (1963).

Área proyectada e índice de área foliar

Para tomar el área proyectada de cada una de las plantas de muestra, se construyó un prototipo el cual corresponde a una placa de poliestireno expandido de dimensiones 1.20 x 0.60 x 0.025 m en donde se plasmaron tres cuadrados dibujados con dimensiones distintas identificadas como C1= 35x35 cm; C2= 45x45 cm; C3= 55x55 cm. Con una estructura de madera se colocó una base para cámara móvil de Smartphone a una altura de 1 m que, al colocar una aplicación de cámara proyectaba una imagen hacia la placa y tomaba una fotografía (figura 2).

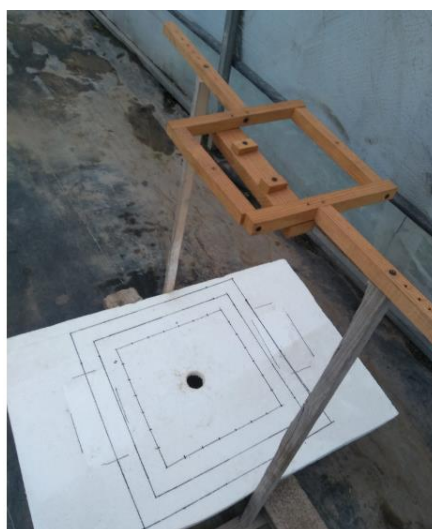


Figura 2. Estructura para la captura de imágenes para el procesamiento del área de cobertura de la lechuga.

Se desarrolló un programa de procesamiento de imágenes en Visual Studio para identificar el área total proyectada de la muestra correspondiente. Esto se logró identificando a través de colores RGB las hojas de la lechuga, colocándolo en color negro y el resto de la imagen en color blanco. Se procesó la imagen contando el número de píxeles negros y blancos, y obteniendo el porcentaje de proyección. Con este resultado se logró obtener el área total en cm^2 de la planta proyectada (figura 3). La determinación de las variables medidas se llevaron a cabo en el laboratorio de Ecología del departamento de enseñanza, investigación y servicio en Fitotecnia de la UACH.

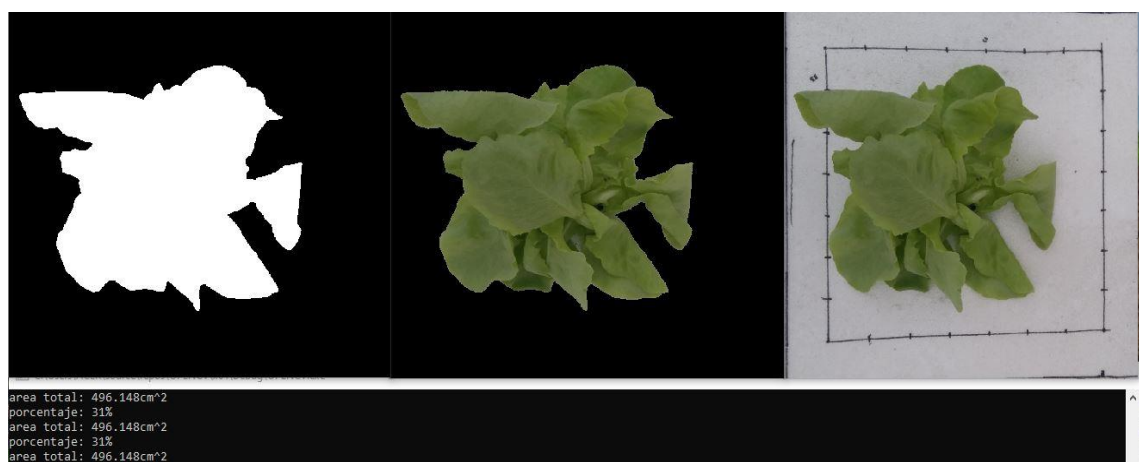


Figura 3. Procesamiento de imágenes para obtener el porcentaje y área de cobertura de la lechuga.

El área foliar se midió con un instrumento LI-COR (modelo LI-3100) para medir área foliar. El método de medición consiste en separar todas las hojas de la lechuga para después colocarlas en el medidor extendiendo la hoja (figura 4). Después de realizar la medición de área foliar, las hojas se colocaron en bolsas de papel para secarlas durante 40 h en un horno a una temperatura de 80°C . Una vez alcanzado un peso constate, el peso seco se midió una báscula digital de 0.01 g de precisión.



Figura 4. Medición de área foliar de la planta de lechuga en el equipo LI-COR modelo LI-3100.

4.3.3 Descripción del modelo. Modelo para crecimiento y acumulación de Nitrógeno

Submodelo de absorción de nitrógeno

Para un cultivo en solución, ésta puede ser modelada por una ecuación de cinética de saturación, esto es:

$$\frac{dN_{up}}{dt} = J_{max} \frac{c_N w}{n_N + K} \quad (1)$$

donde N_{up} (mmol) es el nitrógeno acumulado en el dosel, J_{max} (mmol h⁻¹ g⁻¹ DM) es la tasa máxima de absorción de nitrógeno por unidad de materia seca del dosel, w es el peso seco del dosel, c_N (mM) es la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva, y K (mM) es la constante de semi-saturación para absorción de nitrógeno.

La tasa máxima de absorción de nitrógeno J_{max} declina con el peso seco del dosel:

$$J_{max} = J_{max,0} \exp(-\alpha w) \quad (2)$$

donde $J_{max,0}$ (mmol h⁻¹ g⁻¹ DM) es el valor de J_{max} cuando $w = 0$, y α (g⁻¹ DM) es un coeficiente.

Submodelo de acumulación de materia seca

El submodelo de acumulación de materia seca asume que la lechuga tiene dos reservorios de carbono separados: biomasa estructural y biomasa no estructural. La fotosíntesis del dosel suministra asimilados de carbono a ambos reservorios tanto estructural como no estructural. Las ecuaciones que gobiernan la acumulación de materia seca en los reservorios estructural y no estructural son:

$$\frac{dw_G}{dt} = \mu_{max} \frac{w_S}{w_S + w_G} c_{q10,\mu}^{(T-20)/10} w_G \quad (3)$$

$$\frac{dw_S}{dt} = \theta P_g - \frac{1}{Y_G} \frac{dw_G}{dt} \quad (4)$$

donde t es el tiempo, w_G (g) es el peso seco del reservorio estructural, w_S (g) es el peso seco del reservorio no estructural, μ (h⁻¹) es la tasa de crecimiento de saturación a 20 °C, $c_{q10,\mu}$ es el factor Q₁₀ para crecimiento, T (°C) es la temperatura, θ es un factor para convertir CO₂ a materia seca, P_g [g(CO₂) h⁻¹] es la tasa de fotosíntesis bruta del dosel, y Y_G es la eficiencia de conversión. La suma de w_G y w_S representa el peso seco total del dosel w (g). La inclusión de P_g y $\frac{1}{Y_G} \frac{dw_G}{dt}$ en la Ecuación (4) proporciona la flexibilidad para predecir la reducción en la tasa de crecimiento global que ocurre cuando las plantas se aproximan a la madurez.

Submodelo de fotosíntesis

Las entradas de carbono al submodelo de acumulación de materia seca son calculadas usando un submodelo de fotosíntesis.

$$P_g = A[1 - \exp(-kL_{AI})]f(N_{up}) \frac{\xi I(\sigma C_{CO_2} - \beta)}{\xi I + \sigma C_{CO_2}} \quad (5)$$

donde A (m²) es el área de piso cubierta por planta, k es el coeficiente de extinción, L_{AI} es el índice de área foliar, N_{up} es un coeficiente entre 0 y 1 regulado

por la concentración de nitrógeno en el dosel, ξ [g(CO₂) J⁻¹] es la eficiencia de uso de luz de la hoja, β [g(CO₂) m⁻² h⁻¹] es el punto de compensación de CO₂ para considerar la foto respiración, I (J m⁻² h⁻¹) es la radiación fotosintéticamente activa incidente, C_{CO_2} [g(CO₂) m⁻³] es la concentración de CO₂ en el aire, y σ (m h⁻¹) es la conductancia de la hoja a la difusión de CO₂.

Que el efecto de la concentración de nitrógeno en el dosel sobre la tasa de fotosíntesis es como sigue:

El efecto de la concentración de nitrógeno en el dosel sobre la tasa de fotosíntesis es modelado con la siguiente ecuación:

$$f(N_{up}) = \begin{cases} 0 & \text{cuando } (N_{up}/w) < 0.02 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{N_{up}}{w} - 0.02 \right) \times 100 & \text{cuando } 0.02 \leq (N_{up}/w) \leq 0.05 \\ 1 & \text{cuando } (N_{up}/w) > 0.05 \end{cases} \quad (6)$$

donde 0.05 es la suma de las concentraciones de nitrato y nitrógeno orgánico.

Un numero de los parámetros en la acumulación de materia seca y absorción de nitrógeno muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros del modelo de lechugas como factores de entrada para el análisis de sensibilidad global basado en el cálculo de las varianzas (Zhang et al., 2008).

Parámetros	Unidades	Valor nominal	Límite inferior	Límite superior
θ	adim.	0.68	0.34	1.02
$C_{q10,\mu}$	adim.	1.60	0.80	2.40
k	adim.	0.9	0.45	1.00
ξ	g (CO ₂) J ⁻¹	14×10 ⁻⁶	7×10 ⁻⁶	21×10 ⁻⁶
β	g (CO ₂) m ⁻² h ⁻¹	0.36	0.18	0.54
σ	m h ⁻¹	7.20	3.60	10.8
Y_G	adim.	0.80	0.40	1.20
μ_{max}	h ⁻¹	0.01	0.005	0.015
C_{CO_2}	g (CO ₂) m ⁻³	0.72	0.36	1.08
C_N	mM	7.14	3.57	10.71
$J_{max,0}$	mmol h ⁻¹ g ⁻¹ (DM)	0.0427	0.0175	0.0758
α	g ⁻¹ (DM)	0.1545	0.074	0.2415
K	mM	0.02	0.01	0.06

Implementación del modelo matemático

El modelo matemático fue implementado en el ambiente MATLAB-SIMULINK y consta de un programa principal donde se definen las condiciones iniciales, variables de entrada, el tiempo de simulación y los parámetros del modelo. Adicionalmente, se desarrolló un modelo en Simulink donde se implementó las ecuaciones del modelo dinámico mediante una S-function C-Mex. El programa principal llama al modelo Simulink que contiene el modelo matemático. La integración numérica se llevó a cabo con la formula modificada de Rosenbrock de orden 2 (comando ode23s de Matlab), con tolerancia relativa de 1×10^{-8} .

4.3.4 Método de Sobol de análisis de sensibilidad global

El método FSM mejorado consiste en los siguientes pasos (Fang *et al.*, 2015):

- (1) Generar un muestreo Monte Carlo de dimensión N de los factores de entrada conforme a sus distribuciones aleatorias y formar la matriz A de $N \times s$ (siendo s la dimensión del espacio de entrada), con cada fila un conjunto de parámetros; A es denominada la “matriz de muestreo”.

$$A = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_i^{(1)} & \dots & x_k^{(1)} \\ x_1^{(2)} & \dots & x_i^{(2)} & \dots & x_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(N)} & \dots & x_i^{(N)} & \dots & x_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

- (2) Generar otra matriz de muestreo B de dimensión $N \times s$, denominada la “matriz de re-muestreo”.

$$B = \begin{bmatrix} x_1^{(N+1)} & \dots & x_i^{(N+1)} & \dots & x_k^{(N+1)} \\ x_1^{(N+2)} & \dots & x_i^{(N+2)} & \dots & x_k^{(N+2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(2N)} & \dots & x_i^{(2N)} & \dots & x_k^{(2N)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

- (3) Defina una matriz C_i formada por todas las columnas de B excepto la i -ésima columna obtenida de la i -ésima columna de A .

$$C_i = \begin{bmatrix} x_1^{(N+1)} & \dots & x_i^{(1)} & \dots & x_k^{(N+1)} \\ x_1^{(N+2)} & \dots & x_i^{(2)} & \dots & x_k^{(N+2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(2N)} & \dots & x_i^{(N)} & \dots & x_k^{(2N)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(4) Correspondientemente, defina una matriz D_i formada por todas las columnas de A excepto la i -ésima columna obtenida de la i -ésima columna de B .

$$D_i = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_i^{(N+1)} & \dots & x_k^{(1)} \\ x_1^{(2)} & \dots & x_i^{(N+2)} & \dots & x_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(N)} & \dots & x_i^{(2N)} & \dots & x_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(5) Calcule la salida del modelo para cada conjunto de parámetros de entrada de las cuatro matrices (esto es, para cada fila en cada columna) para obtener vectores de salidas del modelo de dimensión N :

$$y_A = f(A), \quad y_B = f(B), \quad y_{C_i} = f(C_i), \quad y_{D_i} = f(D_i) \quad (11)$$

(6) Los índices de primer orden y de efecto total son calculadas conforme a los estimadores de Sobol. El índice de primer orden se calcula con (Homma y Saltelli, 1996):

$$S_i = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)} = \frac{\bar{V}_i - \hat{f}_0^2}{\bar{V} - \hat{f}_0^2} = \frac{\frac{1}{2N}(\sum_{j=1}^N y_A^{(j)} y_{C_i}^{(j)} + \sum_{j=1}^N y_B^{(j)} y_{D_i}^{(j)}) - \hat{f}_0^2}{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N ((y_A^{(j)})^2 + (y_B^{(j)})^2) - \hat{f}_0^2} \quad (12)$$

donde

$$\hat{f}_0^2 = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} y_B^{(j)} + y_{C_i}^{(j)} y_{D_i}^{(j)}) \quad (13)$$

es la media. El índice de sensibilidad total S_{Ti} fue calcula con el estimador propuesto por Jansen (1999) y recomendado por Saltelli et al. (2010):

$$S_{Ti} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} - y_{D_i}^{(j)})^2}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ((y_A^{(j)})^2 + (y_{D_i}^{(j)})^2) - (\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)})^2 - (\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_{D_i}^{(j)})^2} \quad (14)$$

4.3.5 Calibración del modelo

Para llevar a cabo la estimación de los parámetros del modelo se planteó un problema de optimización, usando el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales para estimar los valores de los parámetros de mayor importancia, los cuales fueron seleccionados previamente mediante el análisis de sensibilidad global. La función para minimizar fue:

$$f(p) = \sum_{j=1}^M (y_j - \hat{y}_j)^2$$

donde y_j representa la variable medida, $\hat{y}_j$ representa los valores estimados por el modelo, M es el número de muestreos durante el periodo de cultivo. El problema de optimización resolvió mediante la rutina *lsqnonlin* del *Optimization toolbox* de Matlab, utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt. Primero se calibraron por separado los parámetros que más influyen en la variable nitrógeno acumulado (Nup), y posteriormente, usando estos valores estimados, se calibraron los parámetros restantes que más influyen en la biomasa estructural (w_G) y biomasa no estructural (w_S), utilizando las mediciones de la biomasa total (w).

El desempeño del modelo fue evaluado con los siguientes índices estadísticos: raíz del error cuadrático medio (RMSE) e índice de eficiencia (EF). La RMSE se calcula con la ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i(\theta))^2}$$

donde y_i es el valor observado, $\hat{y}_i$ es el valor simulado, y n es el número de observaciones. Los RMSE pequeños cercanos a 0 significan un mejor desempeño. El índice de eficiencia EF tiene una interpretación similar al coeficiente de determinación (R^2), y la ecuación es:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Un modelo que predice perfectamente tiene un $EF = 1$.

4.4 Resultados y discusión

Se programó el modelo como función y se implementó en Simulink modelando con valores nominales la absorción de nitrógeno y materia seca de la lechuga con respecto al ciclo de producción (Figura 4) obteniendo una dispersión de valores por lo cual se tuvo que estimar y calibrar parámetros influyentes.

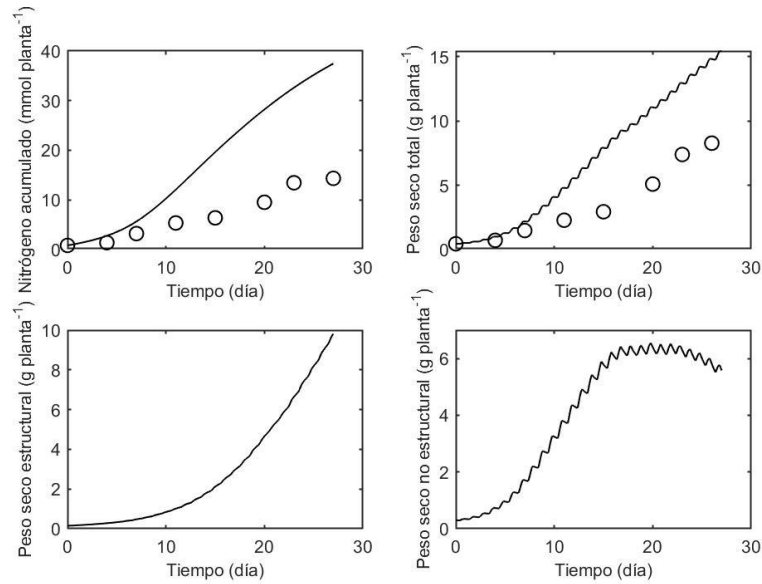


Figura 5. Grafica de absorción de nitrógeno y acumulación de materia seca con respecto al tiempo del ciclo de producción de la lechuga con valores nominales.

Se desarrolló el análisis de sensibilidad global del modelo de absorción de nitrógeno y acumulación de materia seca, obteniendo que α , $C_{q10,\mu}$, $J_{max,0}$, μ_{max} se consideran los parámetros más sensibles al modelar.

Cuadro 2. Sensibilidad de los parámetros en la absorción de nitrógeno y acumulación de materia seca. Método Sobol JANSEN, con 50% de variación del valor de los parámetros, N = 4000. Hipercubo latino, ode23s.

Parámetro	Sensibilidad de Primer orden			Sensibilidad Total		
	N_{up}	W_G	W_S	N_{up}	W_G	W_S
θ	0.07	9.19	4.55	4.29	15.78	11.47
$C_{q10,\mu}$	0.00	0.07	0.08	0.00	0.12	0.12
k	0.09	0.56	0.05	0.57	1.11	0.32
ξ	0.00	0.70	0.27	0.40	1.24	0.81
β	0.00	0.07	0.04	0.10	0.17	0.13
σ	0.13	6.30	3.12	3.72	10.95	6.95
Y_G	0.01	3.64	2.38	1.97	6.84	3.47
μ_{max}	0.00	39.68	46.33	0.50	52.69	57.04
C_{CO2}	0.24	5.82	3.24	3.66	10.83	7.10
C_N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$J_{max,0}$	39.82	13.02	8.13	51.49	20.96	17.63
α	44.75	3.59	9.15	56.41	9.28	18.10
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	85.13	82.65	77.35			

En el cuadro 3, se muestran los valores de los parámetros estimados con LSQNONLIN, obteniendo los valores de $J_{max,0}$ y α , correspondientes a la absorción de nitrógeno; y θ , σ y μ_{max} a la acumulación de biomasa.

Cuadro 3. Parámetros estimados con LSQNONLIN del modelo de absorción de nitrógeno y acumulación de biomasa

Parámetro	Valor estimado	CV
$J_{max,0}$	0.0177	0.1672
α	0.1939	0.0234
θ	0.6790	0.0034
σ	7.1921	0.0029
μ_{max}	0.0114	1.8297

Se obtuvieron las estadísticas de la calibración de los parámetros, obteniendo entre los datos medidos y simulados en la absorción de nitrógeno una RMSE de 1.3892 y una eficiencia de 0.9558; los datos medidos y simulados de materia seca total obtuvieron un RMSE de 1.0645 y una eficiencia de 0.8608 (Figura 6).

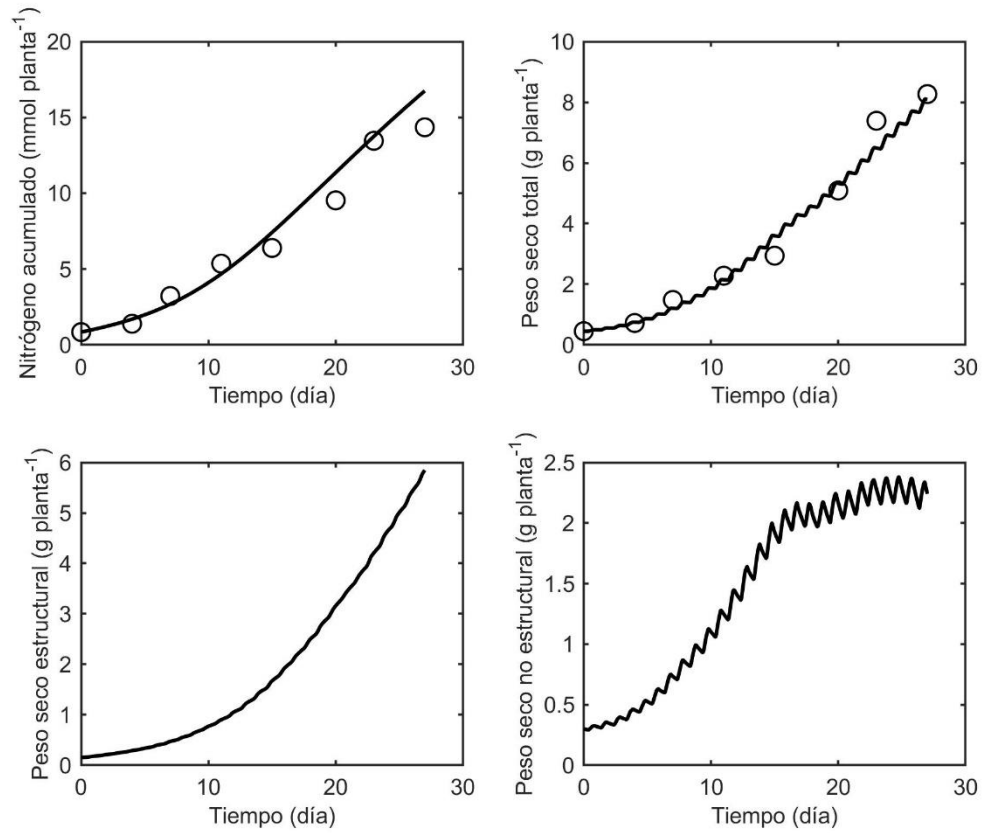


Figura 6. Calibración de los parámetros en absorción de nitrógeno y acumulación de materia seca con Lsqnonlin en la lechuga variedad mantequilla.

4.5 Conclusiones

Se estimaron 5 parámetros ($J_{máx_0}$, α , Θ , σ , μ_{max}) relacionados con la absorción de nitrógeno y acumulación de biomasa en el modelo, obteniendo las estadísticas de la calibración de los parámetros en la absorción de nitrógeno una RMSE de

1.3892 y una eficiencia de 0.9558; y en la acumulación de biomasa un RMSE de 1.0645 y una eficiencia de 0.8608, simulando de manera razonable la acumulación de nitrógeno y biomasa en condiciones limitadas de nitrógeno.

El modelo al considerar el efecto del desarrollo de la planta y del dosel en la tasa de absorción de nitrógeno, tiene el potencial de ser usado para el manejo del nitrógeno en lechugas hidropónica

4.6 Referencias

- Bahadoran, Z., Mirmiran, P., Jeddi, S., Azizi, F., Ghasemi, A., & Hadaegh, F. (2016). Nitrate and nitrite content of vegetables, fruits, grains, legumes, dairy products, meats and processed meats. *Journal of Food Composition and Analysis*. 51(1), 93-105. doi: 10.1016/j.jfca.2016.06.006
- Bian, Z., Cheng, R., Wang, Y., Yang, Q., y Lu, C. (2018). Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Enviromental and Experimental Botany*. 153 (5), 63-71. doi: 10.1016/j.envexpbot.2018.05.010
- Campanella, B., Onor, M., y Pagliano, E. (2017). Rapid determination of nitrate in vegetables by gas chromatography mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 980 (5), 33-40. doi: 10.1016/j.aca.2017.04.053
- Colla, G., Kim, H. J., Kyriacou, M. C., y Roupael, Y. (2018). Nitrate in fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*. 237 (4), 221-238. doi: 10.1016/j.scienta.2018.04.016
- De Graaf, S. C., Stigter, J. D., y Van Straten, G. (2003). Optimal greenhouse climate control for achieving specified lettuce nitrate concentration. *Control Applications of Optimisation*. 36 (8), 163-168. doi: 10.1016/S1474-6670(17)35778-6

- Fu, Y., Li, H. Y., Yu, J., Liu, H., Cao, Z. Y., Manukovsky, N. S., y Liu, H. (2017). Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. youmaicai). *Scientia Horticulturae*. 214 (17), 21-57. doi: 10.1016/j.scienta.2016.11.020
- Giménez, A., Fernández, J. A., Pascual, J. A., Ros, M., López-Serrano, M., y Egea-Gilabert, C. (2019). An agroindustrial compost as alternative to peat for production of baby leaf red lettuce in a floating system. *Scientia Horticulturae*. 246 (6), 907-915. doi: 10.1016/j.scienta.2018.11.080
- Ioslovich, I., Seginer, I. (2000). Acceptable Nitrate Concentration of Greenhouse Lettuce: An Optimal Control Policy for Temperature, Plant Spacing, and Nitrate Supply. *Modelling and Control in Agriculture*. 33 (19), 89-94. doi: 10.1016/s1474-6670(17)40894-9
- Khoshgoftarmanesh, A. H., Hosseini, F., y Afyuni, M. (2011). Nickel supplementation effect on the growth, urease activity and urea and nitrate concentrations in lettuce supplied with different nitrogen sources. *Scientia Horticulturae*. 130 (2), 381-385. doi: 10.1016/j.scienta.2011.07.009
- Kyriacou, M. C., Soteriou, G. A., Colla, G., y Roupahel, Y. (2019). The occurrence of nitrate and nitrite in Mediterranean fresh salad vegetables and its modulation by preharvest practices and postharvest conditions. *Food Chemistry*. 285 (2), 468-477. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.02.001
- Lan, G., Jiao, C., Wang, G., Sun, Y., y Sun, Y. (2020). Effects of dopamine on growth, carbon metabolism, and nitrogen metabolism in cucumber under nitrate stress. *Scientia Horticulturae*. 260 (3), 1-11. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108790
- Lin, S. L., Hsu, J. W., y Fuh, M. R. (2019). Simultaneous determination of nitrate and nitrite in vegetables by poly (vinylimidazole-co-ethylene dimethacrylate) monolithic capillary liquid chromatography with UV detection. *Talanta*. 205 (4), 120082. doi: 10.1016/j.talanta.2019.06.082

- Linker, R., Seginer, I., y Buwalda, F. (2004). Description and calibration of a dynamic model for lettuce grown in a nitrate-limiting environment. *Mathematical and Computer Modelling*. 40 (10), 1009-1024. doi: 10.1016/j.mcm.2004.12.001
- Liu, Y., Vijver, M. G., y Peijnenburg, W. J. G. M. (2014). Comparing three approaches in extending biotic ligand models to predict the toxicity of binary metal mixtures (Cu-Ni, Cu-Zn and Cu-Ag) to lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Chemosphere*. 112 (2014), 282-288. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.04.077
- López Cruz, I. L., Van Willigenburg, L. G., y Van Straten, G. (2003). Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: Differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 40(3), 179-197. doi: 10.1016/S0168-1699(03)00019-X
- López, I. L. C., Ruiz, A. G., Ramírez, A. A., y Vázquez, M. A. P. (2013). Análisis de Incertidumbre de un Modelo Para Lechugas (*Lactuca sativa* L.) Cultivadas en Invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 19 (1), 33-47. doi: 10.5154/r.rchsh.2011.09.049
- Mathieu, J., Linker, R., Levine, L., Albright, L., Both, A. J., Spanswick, R., Wheeler, R., Wheeler, E., DeVilliers, D., y Langhans, R. (2006). Evaluation of the Nicolet Model for Simulation of Short-term Hydroponic Lettuce Growth and Nitrate Uptake. *Biosystems Engineering*. 95 (3), 323-337. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.07.006
- MicroKjeldahl (1963), *Determinacion de nitrógeno por el método de MicroKjeldahl*. PanReacAppliChem. (Manual), España.
- Moreno, E., Sánchez, F., Gutiérrez, J., González, L., y Pineda, J. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 21 (1), 43-55. doi: 10.5154/r.rchsh.2013.12.047

- Pérez, L. U., Lobillo, J. E., Fernández, R. C., y Fernández, V. M. C. (2019). Food safety concerns in urban aquaponic production: Nitrate contents in leafy vegetables. *Urban Forestry and Urban Greening*. 44 (5), 126431. doi: 10.1016/j.ufug.2019.126431
- Seginer, I., Buwalda, F., y Straten, G. (1998). Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Horticultura*. 456 (1), 187-197.
- Viršilė, A., Brazaitytė, A., Vaštakaitė-Kairienė, V., Miliauskienė, J., Jankauskienė, J., Novičkovas, A., Laužikė, K., y Samuolienė, G. (2019). The distinct impact of multi-color LED light on nitrate, amino acid, soluble sugar and organic acid contents in red and green leaf lettuce cultivated in controlled environment. *Food Chemistry*. 12 (6), 125799. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125799
- Viršilė, A., Brazaitytė, A., Vaštakaitė-Kairienė, V., Jankauskienė, J., Miliauskienė, J., Samuolienė, G., Novičkovas, A. y Duchovskis, P. (2019). Nitrate, nitrite, protein, amino acid contents, and photosynthetic and growth characteristics of tatsoi cultivated under various photon flux densities and spectral light compositions. *Scientia Horticulturae*. 258 (1), 108781. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108781
- Zhang, K., Burns, I., y Turner, M. (2008). Derivation of a Dynamic Model of the Kinetics of Nitrogen Uptake Throughout the Growth of Lettuce: Calibration and Validation Derivation of a Dynamic Model of the Kinetics of Nitrogen Uptake Throughout the Growth of Lettuce: Calibration and Validation A. *Journal of Plant Nutrition*. 31 (1), 1440-1460. doi: 10.1080/01904160802208345