



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO Y SU MODELACIÓN EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO CON LECHUGA Y TILAPIA

TESIS QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

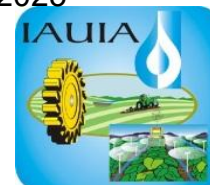
PRESENTA

ANA CRISTINA SÁNCHEZ MARTÍNEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:
DRA. RAQUEL SALAZAR MORENO



Chapingo, Estado de México, 18 de noviembre del 2025



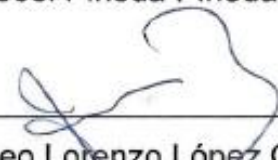
EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO Y SU MODELACIÓN EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO CON LECHUGA Y TILAPIA

Tesis realizada por **M.C Ana Cristina Sánchez Martínez** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: 
Dra. Raquel Salazar Moreno

CODIRECTOR: 
Dr. Joel Pineda Pineda

ASESOR: 
Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

ASESOR: 
Dr. Efrén Fitz Rodríguez

LECTOR EXTERNO: 
Dr. Jorge Flores Velázquez

Tabla de contenido

ÍNDICE DE CUADROS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
DATOS BIOGRÁFICOS	VIII
RESUMEN GENERAL	IX
GENERAL ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	11
1.1 Literatura citada.....	13
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
2.1 ¿Qué es la acuaponía?	14
2.2 ¿Que son los modelos?.....	15
2.3 Estructura de un modelo de crecimiento y desarrollo de cultivos.....	16
2.4 Modelos de crecimiento en cultivo	16
2.5 Modelos de crecimiento de lechugas en invernadero	18
2.6 Modelos de crecimiento de lechugas en un sistema acuapónico.....	20
2.8 Modelos de nutrientes en un sistema acuapónico	21
3. PROPUESTA PARA UN MODELO DE CRECIMIENTO DE LECHUGA EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO	30
4. COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS Y USO EFICIENTE DE NITRÓGENO EN DOS SISTEMAS ACUAPÓNICOS.....	39
5. MODELACIÓN DE NITRÓGENO EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO CON CULTIVO DE LECHUGA Y TILAPIA	58
6. CONCLUSIÓN GENERAL	77

ÍNDICE DE CUADROS

3. PROPUESTA PARA UN MODELO DE CRECIMIENTO DE LECHUGA EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO

Cuadro 1. Variables de estado para el modelo de crecimiento de lechuga.....34

Cuadro 2. Variables manipuladas para el modelo de lechuga.....34

Cuadro 3. Parámetros del modelo de crecimiento de lechuga.....34

4. COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS Y USO EFICIENTE DE NITRÓGENO EN DOS SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Cuadro 1. Composición del alimento para peces utilizado en la investigación.....44

Cuadro 2. Comparación de medias en diversos indicadores de crecimiento de lechuga al momento de la cosecha correspondientes a T1(balsa flotante) y T2 (cama de tezontle).....47

Cuadro 3. Rango de valores en la concentración de NO_3^- , NH_4^+ , en el efluente y estanque de peces, durante los dos ciclos de producción de lechuga en los tratamientos T1 y T2.....53

Cuadro 4. Comparación de los rendimientos de lechuga y tilapia con otros autores.56

5. MODELACIÓN DE NITRÓGENO EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO CON CULTIVO DE LECHUGA Y TILAPIA

Cuadro 1 Descripción de las variables de estado del sistema

Cuadro 2. parámetros del modelo acoplado, parámetros a los que se realizó calibración marcados por (*).

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1 Materia seca de lechuga sangría.....	32
Figura 3. 2 Acumulación de materia seca en lechuga para el primer ciclo de producción	35
Figura 3. 3 Acumulación de materia seca en la parte estructural (parte aérea) y no estructural (raíz) de la planta de lechuga	36
Figura 3. 4 Acumulación de nitrógeno por lechuga.....	37
Figure 4. 1 Aquaponic systems used in the study. A: Treatment 1 (T1), floating raft system; B: treatment 2 (T2), tezontle bedding system.....	42
Figure 4. 2 Dynamics of ammonium (NH_4^+) and nitrate (NO_3^-) concentrations in the effluent, fish pond, and biofilter during the tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i> L.) production cycle in the T1 (floating raft) system.....	47
Figure 4. 3 Dynamics of ammonium (NH_4^+) and nitrate (NO_3^-) concentrations in the effluent and biofilter during the tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i> L.) production cycle in the T2 (tezontle bedding) system.....	48
Figure 4. 4 A: Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) yield (RL) in the first production cycle; B: Lettuce yield (RL) in the second production cycle; C: Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i> L.) yield (RT) over the whole production cycle.	52
Figura 5. 1 Variables medidas de entrada del modelo, Irad [W m^2] (Radiación 70	
Figura 5. 2 Índices de sensibilidad para el cultivo.....	72
Figura 5. 3 Nitrógeno acumulado y peso seco total después de la calibración del modelo	73
Figura 5. 4 Índices de sensibilidad para el cultivo	74
Figura 5. 5 calibración del modelo acoplado.....	75

DEDICATORIA

A mi familia, a mi esposo, a mi hija.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca otorgada para continuar con mi formación profesional y académica.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por la oportunidad de aportar a mi formación académica, profesional y personal.

A los miembros de mi Comité Asesor: Dra. Raquel Salazar Moreno, Dr. Joel Pineda Pineda, Dr. Irineo L. López Cruz, Dr. Efrén Fitz Rodríguez por su apoyo, dirección, sus acertados comentarios y compartir su experiencia, así como conocimientos.

A mis profesores y compañeros de generación quienes me brindaron su amistad y apoyo durante el desarrollo de mi formación académica.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Ana Cristina Sánchez Martínez
Fecha de nacimiento	24 julio de 1991
Lugar de nacimiento	Motozintla, Chiapas
CURP	SAMA910724MCSNRN04
Licenciatura	Ingeniero Mecánico Agrícola
Cédula profesional	09094796
Maestría	Maestría en ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua
Cédula profesional	12901878

Desarrollo académico

Licenciatura	Ingeniería Mecánica Agrícola Universidad Autónoma Chapingo
Maestría	Maestría en ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

RESUMEN GENERAL

EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO Y SU MODELACIÓN EN UN SISTEMA ACUAPONICO CON LECHUGA Y TILAPIA

Ante la creciente necesidad de incrementar la producción de alimentos de manera sostenible, se han desarrollado sistemas como la acuaponía que permiten optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental. Para tratar de explicar el comportamiento de estos sistemas complejos, en donde conviven peces, plantas y bacterias, se han desarrollado modelos dinámicos de flujo de nitrógeno con el propósito de optimizar la eficiencia global del sistema. El objetivo de este trabajo fue comparar el rendimiento y la eficiencia en el uso del nitrógeno en dos sistemas acuapónicos para la producción de lechuga y Tilapia; Asimismo, se desarrolló un modelo dinámico de balance de nitrógeno, con el fin de identificar los parámetros más importantes a fin de optimizarlo. Se registró el crecimiento de plantas y peces, así como los valores de pH, amonio y porcentaje de nitrógeno en el efluente. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos, destacando el sistema con cama de tezontle, que alcanzó rendimientos de hasta $6.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ y una eficiencia en el uso de nitrógeno del 57.86 %, además de una producción de tilapia de $7.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Los datos obtenidos del sistema acuapónico se emplearon para la calibración del modelo dinámico de flujo de nitrógeno, lo que permitió ajustar sus parámetros con mayor precisión. Mediante el análisis de sensibilidad global utilizando el método SAFE, se identificaron los factores que más influyen en el comportamiento del sistema. EL modelo calibrado mostró un desempeño satisfactorio, reproduciendo de manera adecuada tanto el contenido de nitrógeno como la acumulación de materia seca en las plantas, lo que confirma su utilidad para optimizar el funcionamiento de sistemas acuapónicos sostenibles.

Palabras clave: Nitrógeno; modelo; amonio; eficiencia; análisis de sensibilidad.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: M.C. Ana Cristina Sánchez Martínez

Director de Tesis: Dra. Raquel Salazar Moreno.

GENERAL ABSTRACT

EFFICIENCY IN THE USE OF NITROGEN AND ITS MODELING IN AN AQUAPONIC SYSTEM WITH LETTUCE AND TILAPIA

Given the growing need to increase food production sustainably, systems such as aquaponics have been developed to optimize resource use and reduce environmental impact. To explain the behavior of these complex systems—where fish, plants, and bacteria coexist—dynamic nitrogen-flow models have been created with the purpose of optimizing the overall efficiency of the system. The objective of this study was to compare the yield and nitrogen-use efficiency of two aquaponic systems for the production of lettuce and tilapia. Likewise, a dynamic nitrogen-balance model was developed to identify the most important parameters in order to optimize it. Plant and fish growth were recorded, as well as pH, ammonium, and nitrogen percentage in the effluent. The results showed significant differences between treatments, highlighting the tezontle-bed system, which reached yields of up to $6.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and a nitrogen-use efficiency of 57.86%, in addition to a tilapia production of $7.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. The data obtained from the aquaponic system were used to calibrate the dynamic nitrogen-flow model, allowing its parameters to be adjusted with greater precision. Through global sensitivity analysis using the SAFE method, the factors that most influence system behavior were identified. The calibrated model demonstrated satisfactory performance, adequately reproducing both nitrogen content and dry-matter accumulation in the plants, confirming its usefulness for optimizing the operation of sustainable aquaponic systems.

Keywords: Nitrogen; model; ammonium; efficiency; sensitivity analysis.

Thesis of PhD in Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Author: M.C. Ana Cristina Sánchez Martínez

Advisor: Dra. Raquel Salazar Moreno.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Ante la necesidad de aumentar la producción de alimentos se han desarrollado sistemas sostenibles y amigables con el medio ambiente, como la acuaponía. En este sistema se combina la acuicultura con la hidroponía, permitiendo así obtener dos tipos de cultivos: peces y plantas. La acuaponía es considerada como una técnica de producción sustentable y que mitiga los impactos negativos al medio ambiente y contribuye a la seguridad alimentaria (Goddek *et al.*, 2019).

Los sistemas acuapónicos permiten utilizar los desechos orgánicos que son generados por los peces, como el amonio que son excretados a través de sus branquias, orina, heces y del alimento no ingerido por los peces. El amonio en grandes cantidades es tóxico para los peces, sin embargo, a través del proceso de nitrificación es transformado a nitratos, lo cual constituye una fuente de crecimiento para las plantas, estas a su vez actúan como un filtro biológico, absorbiendo los nutrientes necesarios para su desarrollo y el agua regresa a los peces, permitiendo así un medio óptimo para su crecimiento (Zou *et al.*, 2016). La transformación del nitrógeno es un proceso de biotransformación importante en los sistemas acuáticos, particularmente en los sistemas de acuaponía donde el alimento sirve como fuente principal de nitrógeno (Wongkiew *et al.*, 2017).

El Nitrógeno y Fósforo son absorbidos por las raíces de las plantas en forma iónica, preferentemente como Nitratos (NO_3^-) y Fosfatos (PO_4) y menos frecuente como Amonio (NH_4^+) (Moreno & Gonzales, 2015). De acuerdo con Wongkiew *et al.* (2017) los peces utilizan aproximadamente el 20% del nitrógeno (N) y el 50% del Fosforo (P) del alimento para su crecimiento. El resto del N y P (70% y 30%, respectivamente) se excreta por las branquias y como partículas de desecho (10% y 20% para N y P, respectivamente). Los desechos particulados también contienen macro y micronutrientes que los peces no absorben.

El flujo de los nutrientes en los sistemas de producción acuapónicos se ven afectados por una serie de factores tales como; la temperatura exterior e interior, temperatura del agua, el viento, la humedad, la radiación solar, pH, las pérdidas por los procesos de nitrificación y amonificación, entre otros (Hager *et al.*, 2023). Mediante la implementación y simulación de modelos, se puede conocer el comportamiento y flujo de nutrientes, así como el crecimiento de las plantas en el sistema (Toro *et al.*, 2015).

La acuaponía es considerada como un proceso complejo no lineal, de múltiples entradas y salidas que presentan comportamientos variables en el tiempo (Mancilla *et al.*, 2019). Con el aumento de la tecnología y la inmensa investigación en el campo, se han desarrollado herramientas para apoyar el proceso de la toma de decisiones en el diseño y manejo de estos sistemas, tales como evaluación de respuesta a la fertilización, evaluación de nutrientes y desarrollo de modelos de crecimiento de cultivos que permiten predecir el comportamiento y evaluar estrategias sobre el posible manejo de cultivos, sin necesidad de realizar

experimentos costosos. Estos constituyen un elemento importante para tomar decisiones al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas y nutrimentales de los cultivos, el desarrollo de estos y sus rendimientos (Guo *et al.*, 2021).

La utilización adecuada de los modelos solo es posible si el usuario posee un conocimiento sólido de la estructura del modelo, su alcance y sus limitaciones. Por ende, los modelos se desarrollan con diferentes niveles de complejidad que poseen características de más de un grupo (Toro *et al.*, 2015).

El objetivo de este trabajo fue comparar el rendimiento y la eficiencia en el uso del nitrógeno en dos sistemas acuapónicos para la producción de lechuga y Tilapia; Asimismo, se desarrolló un modelo dinámico de balance de nitrógeno, con el fin de identificar los parámetros más importantes con el fin de optimizarlo

El presente trabajo se basa en tres capítulos. En el primer capítulo aborda la introducción general que hace énfasis en el tema estudiado, justificación de tema, objetivos e hipótesis de la presente investigación.

En el segundo capítulo se presenta el estado de arte de los sistemas y los principales modelos acuapónicos desarrollados, así como también los modelos que se han modificado para la simulación de los sistemas empleados en esta investigación.

El tercer capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron durante la primera etapa de la investigación, como el rendimiento, LAI y la transformación de amonio a nitratos en los dos sistemas acuapónicos de producción de lechuga y Tilapia, así como la eficiencia en el uso de Nitrógeno, mediante el enfoque estadístico de comparaciones de medias con la prueba Tukey.

En el cuarto capítulo se explica que la acuaponía se basa en el ciclo del nitrógeno, donde los desechos de los peces se transforman en nutrientes para las plantas. Se compara dos sistemas balsa flotante y cama de tezontle evaluando su eficacia en convertir amonio en nitratos y su impacto en la producción de lechuga y tilapia. Se muestra las diferencias en crecimiento y rendimiento, destacando que la cama de tezontle obtuvo mejores resultados generales.

El capítulo 5 aborda la importancia de los sistemas acuapónicos para una producción sostenible y destaca la necesidad de usar modelos dinámicos que describan los procesos biológicos, físicos y químicos del sistema. Con la información del capítulo anterior se construyó un modelo de flujo de nitrógeno, cuyo análisis de sensibilidad y calibración permitieron identificar parámetros clave y optimizar su desempeño. El modelo calibrado simuló adecuadamente el nitrógeno y la acumulación de materia seca, demostrando que estas herramientas son esenciales para mejorar la eficiencia y funcionamiento de sistemas agrícolas sustentables.

1.1 Literatura citada

- Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., & Keesman, K. J. (2019). Decoupled aquaponics systems. *Aquaponics food production systems*, 201. ISBN 978-3-030-15942-9. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6> (Recuperado: julio 2023)
- Guo, Y., Zhao, H., Zhang, S., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124843. ISSN: Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620348873> (Revisado: Junio del 2023)
- Hager, J., Bright, L. A., Tidwell, J. H., & Dusci, J. (2021). *A Practical Handbook for Growers-Aquaponics Production Manual*. Kentucky State University, Kentucky, USA.
- Mancilla-Morales, José A., Tornero-Campante, Mario A., & López-Cruz, Irineo L. (2019). Evaluación de un modelo matemático para predecir el crecimiento y contenido de nitrógeno en jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) de invernadero. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 11(2), 111-125. Epub 24 de agosto de 2020. <<https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.06.013> (Revisado: Junio del 2023)
- Moreno, B., Soto, K., & González, D. (2015). El consumo de nitrato y su potencial efecto benéfico sobre la salud cardiovascular. *Revista chilena de nutrición*, 42(2), 199-205. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182015000200013>
- Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramirez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2015). Estimation models for the reference evapotranspiration value in the northern banana zone of Antioquian Uraba (Colombia). *Agrociencia*, 49(8), 821-836 ISSN: <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v49n8/v49n8a1.pdf> (Revisado: Junio del 2023)
- Wang, H., Qiub, F. & Ruan, X. (2016). Loss or gain: A spatial regression analysis of switching land conversions between agriculture and natural land. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221(1), 222-234.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W., Khanal, S.K., (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. *Aquac. Eng.* 76, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>. (Revisado: mayo 2024)
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Liang, S., Wang, J., & Yan, R. (2016). Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ¿Qué es la acuaponía?

El aumento constante de la población, la disminución de suelos agrícolas y la escasez de agua, que amenazan el abastecimiento de alimentos han generado tecnologías más eficientes para la producción de alimentos como la acuaponía (Pertierra & Quispe, 2020; Aleksić & Vanja, 2020). En México la acuaponía ha adquirido mayor importancia brindando beneficios sociales y económicos, que se han convertido en una fuente de alimentación con un valor nutrimental elevado (Martínez & Leung, 2014).

La acuaponía tiene muchas ventajas sobre los métodos agrícolas tradicionales. Es más eficiente en la optimización de agua, suelo y requiere menor cantidad de pesticidas y fertilizantes. Los nutrientes, que la planta necesita se aprovechan de los residuos de los peces evitando así la implementación de estos, y a su vez se obtienen dos tipos de cultivo (peces y hortalizas), y se pueden implementar en pequeños espacios (Bambhaniya *et al.* 2023).

La acuaponía puede definirse como un sistema de cultivo de peces y plantas en un ambiente controlado. Donde los desechos orgánicos producidos por los peces son transformados, a través del proceso de nitrificación, en nitratos, que sirven como fuente de alimento para las plantas. Estas a su vez al tomar los nitratos, limpian el agua para los peces actuando como un filtro biológico y formando un ciclo simbiótico entre peces, bacterias y plantas (Ibrahim *et al.*, 2023).

El sistema acuapónico (SA) se compone de los siguientes elementos: 1) estanque para peces u otros organismos acuáticos; 2) biofiltro, 3) cama de crecimiento para plantas; 4) sistema de bombeo de agua y; 5) sistema de aireación (Lennard & Leonard, 2005). Esos elementos se interconectan, y permiten que el agua enriquecida con nutrientes pase del tanque de peces al biofiltro, y posteriormente a las plantas (Ramírez, 2009). El biofiltro es el encargado del proceso de nitrificación por medio del consorcio microbiano, sin embargo, existen sistemas que no cuentan con este ya que la nitrificación se puede llevar a cabo en una cama de plantas con sustrato el cual provee de una superficie suficiente para el crecimiento de bacterias. En general, el agua se recircula a través del biofiltro a la cama de plantas y posteriormente al tanque de peces (Maucieri *et al.*, 2018).

El estanque de los peces debe seleccionarse cuidadosamente, por su incidencia en el costo total de la unidad acuapónica (Somerville *et al.*, 2014). Los materiales plásticos o de fibra de vidrio son recomendados por su durabilidad; aunque el plástico deberá considerarse la incidencia de rayos UV, ya que estos resecan el material, provocando su fácil destrucción ante eventuales golpes. Otro de los factores importantes a considerar es la cantidad de peces en el sistema, ya que en pequeños volúmenes los peces compiten por espacio y oxígeno (Ramírez, 2009).

En cuanto a la cama de plantas los sistemas acuapónicos utilizan principalmente dos tipos de sistemas de crecimiento, los mismos que son utilizados en hidroponía: balsas flotantes y camas con sustrato sólido. Los cultivos de “balsas flotantes”, se caracterizan por el gran volumen de agua que realiza la función de reservorio del sistema, además de alojar al componente vegetal del mismo (Somerville, 2014). Estos reservorios, pueden construirse con cajones, bateas, artesas, etc., los que se llenan enteramente, y flotando en ellos, se colocan planchas de poliestireno u otro material similar, en el cual se realizan perforaciones que alojen los vegetales a cultivar. Las planchas protegen al agua de la exposición solar y de la incidencia de la temperatura ambiental. La gran masa de agua brinda en estos sistemas una gran estabilidad térmica y de la calidad del agua en general. También permite una carga de peces relativamente alta, generando mejores rendimientos económicos en el componente acuícola y es el método de cultivo que mejor se adapta a una escala comercial, por su gran practicidad en el manejo de la hidroponía al facilitarse y ordenarse las tareas de siembra y cosecha (Candarle, 2015).

Por otro lado, la cama con sustrato, se encuentran enteramente llenos de algún tipo de material inerte, elemento que brindará una serie de beneficios al sistema. La primera función que cumple el sustrato es brindar una importante superficie de contacto para el alojamiento y colonización de las bacterias nitrificantes; destacándose como el método más eficiente con respecto al proceso de nitrificación, evitando la necesidad de instalación de un biofiltro (Candarle, 2015).

2.2 ¿Que son los modelos?

Un modelo es una representación simplificada de un sistema o un conjunto de ecuaciones, el objetivo es ayudar en la explicación, la comprensión o mejorar el rendimiento del sistema (Lak and Minaei 2015). La modelación de un sistema se representa matemáticamente, con base en la relación entre sus elementos interconectados. La acuaponía es un sistema en el cual las variables del clima, transpiración, humedad y nutrientes influyen en el crecimiento y desarrollo del cultivo, las cuales en conjunto conforman el modelo matemático. La

representación simplificada de este sistema se obtiene mediante balances de energía y masa para satisfacer diversos objetivos entre los cuales destacan producir la máxima cantidad de un producto de la más alta calidad a un bajo precio y con requerimientos mínimos de energía (Rodríguez *et al.*, 2015).

Los modelos se pueden clasificar de acuerdo con la finalidad con la que se diseñan. Pueden ser modelos estadísticos, los cuales expresan la relación entre los componentes del rendimiento y parámetros meteorológicos, modelos mecanicistas o explicativos que explican no sólo la relación entre los parámetros de tiempo y el rendimiento, los modelos deterministas estiman el valor exacto del rendimiento o la variable dependiente, modelos estocásticos estos definen el rendimiento o estado de variable y modelos dinámicos que describen el modo en el cual el sistema cambia con respecto al tiempo y, por lo tanto, es posible seguir la evolución temporal de cada una de las variables del sistema (ejemplo: balance de nitrógeno o hídrico en el suelo (Jones *et al.*, 2016)).

2.3 Estructura de un modelo de crecimiento y desarrollo de cultivos

La ecuación diferencial que define el desarrollo y crecimiento de un cultivo es el siguiente (Wallach *et al.*, 2018; López *et al.*, 2005):

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, p), \quad x(t_0) = \beta \quad (1)$$

$$x \in R^n, u \in R^m, p \in R^q \text{ y } \beta \in R^n \quad (2)$$

Donde:

$x \in R^n$ es el vector de los estados que contiene n variables que caracterizan el cultivo como peso seco, número de frutos, índice de área foliar entre otras, $u \in R^m$ el vector de las entradas contiene m variables tales como temperatura, concentración de CO₂ y radiación fotosintéticamente activa, PAR. $p \in R^q$ es el vector que representa q parámetros o constantes biológicas del modelo. β representa el vector de valores de las condiciones iniciales de las variables de estado.

$\frac{dx}{dt}$ es el conjunto de ecuaciones dinámicas que representan la tasa de cambio de las variables de estado.

2.4 Modelos de crecimiento en cultivo

Un modelo de cultivo es la simulación dinámica del crecimiento del cultivo, la simulación se realiza con base a una programación de integración numérica implementada en computadora. Este programa describe la dinámica del crecimiento del cultivo con respecto al tiempo, se obtienen variables que

describen el estado del cultivo en diferentes puntos, por ejemplo, la biomasa por unidad de área, el estadio de desarrollo, rendimiento, contenido de nitrógeno foliar, la materia seca, que a su vez se pueden modelar como función de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), el uso eficiente de la luz (LUE) y el coeficiente de extinción de luz (k) (Wallach *et al.*, 2018).

A partir de la década de los 70's se han desarrollado modelos para distintos tipos de cultivos. De acuerdo con Jones *et al.* (1987) el procedimiento para la modelación y simulación de un sistema de producción agrícola es el siguiente: 1. Establecer un objetivo claro, definir el problema y la información que se pretende obtener con la simulación; 2. Definir los componentes del sistema, sus límites, entradas y salidas; 3. Efectuar una amplia revisión de la información disponible; 4. Desarrollar el modelo a través de diagramas que representen los componentes del sistema y sus interrelaciones; 5. Programar los códigos en la computadora; 6. Verificar, calibrar y validar el modelo; 7. Análisis de sensibilidad, identifica los parámetros que tienen mayor importancia en el modelo y verifica qué tanto cambia una salida al cambiar un parámetro; 8. Aplicación del modelo (Turner *et al.* 2016).

Schwartz *et al.* (1990) desarrollaron un modelo para simular el crecimiento y desarrollo de los cultivos a partir del área foliar; la cual a su vez utilizó la masa foliar por el área foliar específica. La fotosíntesis se simuló a través de funciones hiperbólicas, mientras que la regulación alométrica permitió simular la partición de asimilados. Por otro lado, Jones *et al.* (1998) desarrollaron un modelo de simulación enfocado a proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales, conocido como Sistema de Apoyo para Decisiones de Transferencia de Agrotecnología (DSSAT, por sus siglas en inglés). Los modelos de simulación de cultivos del DSSAT utilizan archivos de datos para clima, suelo y manejo del cultivo, ofreciendo una de las mejores aproximaciones del comportamiento de estos. Sin embargo, estos modelos de simulación deben diseñarse en una amplia escala temporal y espacial, para entender mejor los procesos.

Gary *et al.* (1998) mencionan que los modelos potenciales son aquellos que durante todo el periodo de crecimiento y desarrollo de los cultivos no presenta limitaciones relacionadas con agua, nutrición, arvenses, enfermedades o plagas; bajo estas condiciones, la tasa de crecimiento está determinada principalmente por la radiación solar, la temperatura y el estado actual del cultivo. Es decir que en condiciones consideradas "óptimas", sólo el clima y las características del cultivo pueden ser limitantes. En los cultivos los principales objetos de modelación son el crecimiento, el desarrollo, la producción y el balance de agua y nitrógeno, a partir de datos de entrada relacionados con el clima, el suelo y el sistema de cultivo.

Otro enfoque en el desarrollo de modelos de cultivos fue dado por Marcelis *et al.* 1998, indican que la mayoría de los modelos de cultivos son de tipo explicativo basados en la fotosíntesis o también conocidos como modelos proceso-orientados. El principio de funcionamiento de estos modelos plantea que el rendimiento de un cultivo, en volumen y calidad, se determina por la producción y distribución de masa seca y el contenido de masa seca en la parte cosechable.

En este tipo de modelos la intercepción de la luz por las hojas se calcula para simular la producción de foto asimilados, compuestos que a su vez se utilizan, en una proporción, para la respiración de mantenimiento y crecimiento, mientras que el restante se distribuye en los diferentes órganos en crecimiento (raíz, tallo, hojas, flores, frutos).

A diferencia de los análisis de crecimiento, que se basan en modelos empíricos, los modelos explicativos relacionan el crecimiento y desarrollo de los cultivos con procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis y respiración. El modelo de simulación de cultivos SUCROS (a Simple and Universal Crop Growth Simulator) (Goudriaan y Van Laar, 1994) utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias no-lineales para estudiar el comportamiento y predecir la producción de biomasa de cultivos anuales.

Con el paso del tiempo se han desarrollado modelos matemáticos para hortalizas cultivadas en condiciones de invernadero. Gary *et al.* (1998b) informaron que el número de especies estudiadas hasta 1998 ascendía a 25 especies de frutales, 23 especies vegetales cultivadas a campo abierto, 20 ornamentales y 4 especies vegetales cultivadas en invernadero. Algunos modelos explicativos desarrollados para algunas hortalizas importantes son: pepino (*Cucumis sativus* L.) (Marcelis, 1994a, 1994b), lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Sweeney *et al.*, 1981; Van Henten, 1994; Seginer *et al.*, 1998; Seginer *et al.*, 2000). De acuerdo con la literatura revisada, la hortaliza más importante es la lechuga, ya que se trata de un cultivo relativamente simple que se ha usado ampliamente en estudios de optimización y control.

2.5 Modelos de crecimiento de lechugas en invernadero

En la producción de lechugas en invernadero, los modelos tienen aplicabilidad en el manejo del cultivo. Gary *et al.* (1998a) proveen información cuantitativa para la toma de decisiones y ayudan a hacer estimaciones de rendimiento potencial y necesidades de agua. Algunos modelos de desarrollo y crecimiento de lechugas han llegado a tener como características relevantes la simulación de intercepción de radiación solar por el dosel, la simulación de fotosíntesis bruta (Marcelis *et al.*, 1998), la distribución de biomasa (Heuvelink 1996, 1999; Marcelis, 1994b), peso seco estructural y no estructural afectado por la radicación, la concentración de CO₂, temperatura del aire (Van Henten 1994) y el carbono (Seginer *et al.*, 1998).

Seginer (2003) desarrolló un modelo que predice el crecimiento de la planta y el contenido de nitratos en el rango normal de condiciones ambientales de invernadero, ampliado para cubrir situaciones de alto estrés por nitrógeno. Las simulaciones con el modelo ilustran su capacidad para predecir el efecto de la luz, la temperatura y el nitrógeno en la solución nutritiva sobre el crecimiento y la composición a largo plazo de la lechuga. El modelo anterior se ha aplicado a cuatro escenarios: suministro abundante de nitrógeno, estrés leve por N, estrés severo por N y cambios ontogenéticos de compuestos orgánicos y contenido de agua (en solución). Zhang *et al.*, (2008) desarrolló un modelo que predice la absorción de nitrógeno (N) a lo largo del crecimiento del cultivo de lechuga cultivadas en solución nutritiva bajo diversas condiciones de luz natural. El modelo combina la absorción de nitrógeno con la acumulación de materia seca utilizando un enfoque mecanicista de dos compartimentos, que incorpora depósitos estructurales y no estructurales. Conversa & Elia (2019) desarrollaron un modelo con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de Nitrógeno de la planta, realizaron dos experimentos para estudiar (i) el crecimiento y la productividad, (ii) la eficiencia del uso de nitrógeno, (iii) la curva de dilución crítica de N, y (iv) la demanda de N. El modelo proporcionó evidencia de que el crecimiento y la absorción de nitrógeno se ven afectados por las características genéticas del cultivo, ya que alguno de estos tiene una mayor capacidad para absorber nitrógeno y una mayor eficiencia en el uso de nitrógeno para la producción de materia seca.

Recientemente, Ben *et al.* (2010), sugieren medir la temperatura de la hoja de la planta (T_c), ya que esta normaliza el índice de estrés hídrico del cultivo, y también proporciona una buena indicación del estado hídrico de la planta; sin embargo, esto es algo difícil de realizar, debido a que los sensores son una herramienta costosa. Harwood *et al.* (2010) implementaron un modelo que permite conocer las mejores distribuciones de los cultivos con respecto a la variabilidad de las condiciones ambientales y latitudes dentro del campo. El modelo permite simular múltiples tipos de cultivos a la vez, lo que permite una mejor gestión de la incertidumbre a escala. Sin embargo, la validación en un rango alto de latitudes revela una deficiencia en el modelo en el sentido de que no logra capturar las tendencias de fin de temporada en latitudes muy altas.

Por otro lado, Maes y Steppe (2012) indicaron que la transpiración de la planta es quizás el mejor indicador del estado hídrico de la misma, demostrando que las plantas que experimentan un suministro de agua sin restricciones (plantas bien regadas) transpiran a un ritmo más alto en comparación con las plantas que experimentan escasez de suministro de agua. Mathieu *et al.* (2013) utilizó el modelo Nitrate Control in Lettuce (NICOLET) para evaluar tanto a corto como a

largo plazo los cambios en el crecimiento y acumulación de nitratos, el modelo NICOLET simuló con precisión el crecimiento del cultivo de lechuga y la absorción de nitrato a largo plazo.

La modelación de sistemas se ha aplicado con éxito para simplificar y modelar procesos ambientales y biológicos complejos predecir respuestas biológicas de variables en el tiempo (Saveedra *et al.*, 2017). Se han desarrollado distintos tipos de modelo de crecimiento de lechugas, para diferentes sistemas, tales como: técnica de la película de nutriente (NFT) y acuaponía. Esta última ha cobrado importancia, debido a que se obtiene dos tipos de alimento, e implica muchas variables y parámetros, sin embargo, los modelos que se ocupan en general son para campo abierto y no se cuenta con un modelo ajustado y calibrado para este sistema.

2.6 Modelos de crecimiento de lechugas en un sistema acuapónico

Schaible y Aillery. (2012), Gonzales (2017) y Bradley *et al.* (2018), mencionan las ventajas de utilizar la técnica de acuaponía tales como: Uso eficiente del agua, bajo impacto ambiental, fuente local de alimentos, Bajo uso de energía, producción orgánica; puede ser implementada a pequeña o gran escala, se obtienen dos fuentes de ingreso, a partir del cultivo de plantas y peces que se traduce en un incremento en la economía local.

En la actualidad existen diferentes técnicas hidropónicas para el cultivo de lechuga, utilizadas en la acuaponía, como lo es la técnica de película de nutrientes (NFT), raíz o balsa flotante y por medio de sustratos como lo es el tezontle, el cual sirve para fijación de la raíz y a su vez filtra y transforma los nutrientes. Lennard y Leonard (2006) encontraron que el sistema de técnica de película nutrientes (NFT) era menos eficiente con respecto a la eliminación de nutrientes y el rendimiento de la lechuga que el sistema de balsa flotante o de base mediana. Tyson *et al.* (2011) sugirieron más investigación a largo plazo, porque la falta de información sobre los factores de éxito es una de las razones por las que la mayoría de los sistemas acuapónicos solo se usan como pasatiempo o para la educación y no para la producción comercial.

Jiménez *et al.* (2014) evaluaron el efecto de la aplicación simple y combinada de extracto en fertilización orgánica y fertilización mineral en cultivo de lechuga bajo un sistema acuapónico, con el fin de aumentar la producción. Se obtuvieron resultados positivos en cuanto a rendimiento, sin embargo, también demostraron que las altas dosis de fertilización afectan negativamente en la conductividad eléctrica.

Por otro lado, Estrada *et al.* (2018) realizaron un modelado estocástico para predecir y analizar la producción de lechuga y tilapia, bajo un sistema acuapónico donde los análisis de regresión y sensibilidad mostraron que el oxígeno disuelto, la densidad, la temperatura y la conductividad eléctrica afectaron significativamente la producción, obteniendo rendimientos altos en Tilapia y lechuga, al sembrar a una densidad de 90 peces m⁻³. En este mismo año Adeyemi *et al.* (2018) desarrollo un modelo para la predicción dinámica de la transpiración de plantas de lechuga cultivadas en invernadero. El modelo basado en datos tiene la radiación entrante, el déficit de presión de vapor como variables de entrada, y su estructura varía en función del crecimiento de la planta en forma de evolución de LAI. Este modelo se aplica para predecir la transpiración del cultivo, cuando hay un cambio significativo en el estado del agua.

Keesman *et al.* (2018) desarrollaron un modelo más completo desde una perspectiva teórica de sistemas acuapónicos en un sistema de recirculación simple, implementaron submodelos para el cultivo de plantas, así como para el tanque de peces, digestores anaeróbicos y bacterias. La ventaja de estos modelos teóricos presentados sobre los modelos estadísticos es su mayor capacidad para analizar el proceso subyacente a la acuaponía y la posibilidad de modelar el aspecto del tiempo (dinámica). Sin embargo, mantener el equilibrio en los subsistemas como los niveles de nutrientes, calidad de agua y obtener productos de buena calidad es un reto para los investigadores. Los altos niveles de nitratos (NO₃) pueden ocasionar problemas de salud, ya que generan compuestos carcinogénicos. Lara *et al.* (2019) evaluaron el crecimiento y acumulación de NO₃⁻ en lechuga con diferentes relaciones de NO₃⁻/NH₄⁺ en la solución nutritiva en dos estaciones de cultivo. Los resultados mostraron que las diferentes estaciones de cultivo no afectan el crecimiento de las plantas de lechuga, aunque la concentración de NO₃⁻ fue menor en otoño comparado con la concentración en verano. La aplicación de NH₄⁺ en concentraciones mayores a 20 % afectó negativamente el crecimiento de las plantas; sin embargo, estas concentraciones de NH₄⁺ pueden reducir hasta 15 % la acumulación de NO₃⁻ en las hojas, mejorando así la calidad para su consumo.

2.8 Modelos de nutrientes en un sistema acuapónico

Kloas *et al.* (2015) desarrollaron un sistema acuapónico de recirculación doble (DRAPS) que tiene como desafío lograr el suministro de alimentos para la creciente población mundial mediante la producción intensiva de alimentos a gran escala. Los sistemas de producción son independientes entre sí, lo cual permite mantener las condiciones óptimas en calidad de agua, nutrientes y pH, para diferentes ciclos, mejorando la productividad en forma intensiva tanto como en peces como en lechugas. En la nutrición de cultivos, el nitrógeno es uno de los

elementos que influye en el crecimiento y desarrollo de estos. Sánchez *et al.* (2016) implementaron un modelo dinámico para simular la concentración de nitrógeno amoniacal total (TAN), nitrito y nitrato en un cultivo integrado de camarones patiblanco, en un sistema de recirculación, sin intercambio de agua. El modelo dinámico demostró que se puede explicar las concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto y las variaciones de las concentraciones a lo largo del tiempo. También encontraron que las bacterias nitrificantes y heterótrofas juegan un papel importante en la transformación de los compuestos nitrogenados disueltos; por lo tanto, estas bacterias deben ser consideradas dentro de la dinámica del nitrógeno en sistemas integrados con bajo intercambio de agua. Este modelo es útil para optimizar la densidad de población de las especies cultivadas.

Quispe *et al.* (2018) evaluaron el rendimiento, concentración de nitratos, calidad microbiológica y funcional en lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en dos sistemas de producción: acuapónico e hidropónico. Las lechugas se cultivaron en un sistema acuapónico con residuos de los peces y en un sistema hidropónico con solución nutritiva (Hoagland II-modificada) durante 21 días. En las lechugas acuapónicas se determinó una concentración menor de nitratos respecto a lechugas hidropónicas. Indicaron que el sistema acuapónico es una alternativa sustentable para la producción de lechugas de alta calidad, considerando su buen rendimiento, menor concentración de nitratos, similar calidad microbiológica y funcional respecto a los sistemas hidropónicos.

Li *et al.* (2021) propusieron un modelo dinámico de concentración de nitrógeno en el sistema acuapónico, basado en un sensor de filtrado adaptativo para la medición en tiempo real de la concentración total de nitrógeno en un sistema acuapónico. El método propuesto en este modelo sienta las bases para el control de la alimentación de los peces y el monitoreo de la calidad del agua, para mejorar las condiciones óptimas de los cultivos (peces y plantas).

Existe un campo de investigación para el flujo de nutrientes, de nitrógeno y principalmente en fósforo donde el campo de investigación aun no es muy explorado.

3. Literatura citada

Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., Domun, Y., & Norton, T. (2018). Dynamic modelling of lettuce transpiration for water status monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 50-57. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.008> 2. Bambhaniya, I., Kamleshbhai, B., & Bajaniya, V. (2023) UNLOCKING SUSTAINABLE AGRICULTURE: AQUAPONICS SYSTEM. DIMENSION IN AGRICULTURAL SCIENCES, 45. ISBN: 978-93-5850-588-7. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/374449096>
- Ben-Gal, A., Kool, D., Agam, N., van Halsema, G.E., Yermiyahu, U., Yafe, A., Presnov, E., Erel, R., Majdop, A., Zipori, I., Segal, E., Rüger, S., Zimmermann, U., Cohen, Y., Alchanatis, V., Dag, A., (2010). Whole-tree water balance and indicators for short-term drought stress in non-bearing “Barnea” olives. *Agric. Water Manag.* 98, 124–133. ISSN: Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.008> (Revisado: Junio del 2023)
- Bradley, M., Lane, S., & Woodbury, N. (2018). Modeling and Control of an Aquaponics System. ISSN: http://apmonitor.com/do/uploads/Main/Report_aquaponics2018.pdf. (Revisado: Junio del 2023)
- Casanova, M. P., Messing, I., Joel, A., & Cañete, A. M. (2009). Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile. *Chilean journal of agricultural research*, 69(1), 60-70. <https://pdfs.semanticscholar.org/ce8c/48deabd8fdb8c8004100adb9e538f21b48bc.pdf> (Revisado: Junio del 2023)
- Conversa, G., & Elia, A. (2019). Growth, critical N concentration and crop N demand in butterhead and crisphead lettuce grown under Mediterranean conditions. *Agronomy*, 9(11), 681.
- Edinson, W., Moreno, S., & Zafra, T., A. (2014). Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactucasativa*, con efluentes de cultivo de tilapia. *REBIOL* 2014; 34(2): 60-72, Julio – Diciembre. ISSN: Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/4395> (Revisado: Junio del 2023)
- Estrada-Perez, N., Hernandez-Llamas, A., MJ Ruiz-Velazco, J., Zavala-Leal, I., Romero-Bañuelos, C. A., Cruz-Crespo, E., ... & Campos-Mendoza, A. (2018). Stochastic modelling of aquaponic production of tilapia (*Oreochromis niloticus*) with lettuce (*Lactuca sativa*) and cucumber (*Cucumis sativus*). *Aquaculture Research*, 49(12), 3723-3734. ISSN: Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/are.13840> (Revisado: Junio del 2023)

- Gary, C., Jones, J.W., and Tchamitchian, M. (1998). Crop modelling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae*, 74:3-20. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423898000806> (Revisado: Junio del 2023)
- Gary, c., Tchamitchian, m., Bertin, n., Charasse, I., Rebillard, A. & Cardi, j. P. (1998b). Simulserre: an educational software simulating the greenhouse-crop system. *Acta Horticulturae* 456: 451-458. ISSN: Disponible en: https://www.actahort.org/books/456/456_54.htm (Revisado: Junio del 2023)
- González, H., Rubio-Cabrera, S. G., García-Ulloa, M., Montoya-Mejía, M., & Magallón-Barajas, F. J. (2017). Análisis técnico de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía. *Agroproductividad*, 8(3), 15-19. ISSN: Disponible en: <https://biblat.unam.mx/hevila/Agroproductividad/2015/vol8/no3/3.pdf>. (Revisado: Junio del 2023)
- Goudriaan, j. & Van Laar h. H. (1994). *Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands. 238 p. ISSN: Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3FPtCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=9.%09GOUDRIAAN,+J.%3B+VAN+LAAR+H.+H.+1994.+Modelling+Potential+Crop+Growth+Processes.+Textbook+with+Exercises.+Kluwer+Academic+Publishers.+Dordrecht,+the+Netherlands.+238+p.&ots=yrcuURXUmP&sig=6K85G84N2Lno8ofn2EC3YSNRHNM> (Revisado: Junio del 2023)
- Harwood, T. D., Al Said, F. A., Pearson, S., Houghton, S. J., & Hadley, P. (2010). Modelling uncertainty in field grown iceberg lettuce production for decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(1), 57-63. (Revisado: Junio del 2023)
- Heuvelink, E. (1996). *Tomato growth and yield: quantitative análisis and synthesis*. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands. 326 p.: Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/63d3499a7abf92da21725bb0410836dc/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y> (Revisado: Junio del 2023)
- Ibrahim, L. A., Shaghaleh, H., El-Kassar, G. M., Abu-Hashim, M., Elsadek, E. A., & Alhaj Hamoud, Y. (2023). Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency. *Water*, 15(24), 4310.

- Jiménez, M. V. D., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., & Volke-Haller, V. H. (2014). Modelos de simulación del crecimiento de lechuga en respuesta a la fertilización orgánica y mineral. *Revista fitotecnia mexicana*, 37(3), 249-254. ISSN: doi: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802014000300011&script=sci_abstract&tlng=pt (Revisado: Junio del 2023)
- Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., ... & Singh, U. (1998). Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. Understanding options for agricultural production, 157-177. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3624-4_8 (Revisado: Julio del 2023)
- Jones, J.W., J.M. Antle, B. Basso, K.J. Boote, R.T. Conant, I. Foster, C.J. Godfray, M. Herrero, R.E. Howitt, S. Janssen, B.A. Keating, R. Munoz-Carpena, C.H. Porter, C. Rosenzweig, & T.R. Wheeler. (2016). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agr. Sys.* (article in press). Doi: 10.1016/j.agsy.2016.09.021. (Revisado: Junio del 2023)
- Jones, J.W., Mishoe, J.W., & Boote, K.J. (1987). Introduction to simulation and modelling. Technical Bulletin No. 100. Food and Fertilizer Technology Center. Gainesville: ASPAC. 19p: Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3FPtCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=9.%09GOUDRIAAN,+J.%3B+VAN+LAAR+H.+H.+1994.+Modelling+Potential+Crop+Growth+Processes.+Textbook+with+Exercises.+Kluwer+AmP&sig=6K85G84N2Lno8ofn2EC3YSNRHNM> (Revisado: Junio del 2023)
- Kloas, Werner, Roman Groß, Daniela Baganz, Johannes Graupner, Henrik Monsees, Uwe Schmidt, Georg Staaks, Johanna Suhl, Martin Tschirner, Bernd Wittstock, Sven Wuertz, Andrea Zikova, and Bernhard Rennert. (2015). "A New Concept for Aquaponic Systems to Improve Sustainability, Increase Productivity, and Reduce Environmental Impacts." *Aquaculture Environment Interactions* 7 (2): 179–92. <http://dx.doi.org/10.3354/aei00146> (Revisado: Junio del 2023)
- Lak M. and S. Minaei S. (2015). Crop growth modeling: a potential method for site-specific management of greenhouses. Conference: The GreenSys2015 - International Symposium on New Technologies and Management for Greenhouses. https://www.researchgate.net/publication/280521891_Crop

_growth_modeling_a_potential_method_for_sitespecific_management_of_greenhouses (Revisado: Junio del 2023)

- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14, 539–550. ISSN: <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2> (Revisado: Junio del 2023)
- Li, H., Li, W., McEwan, M., Li, D., Lian, G., & Chen, T. (2021). Adaptive filtering-based soft sensor method for estimating total nitrogen in aquaponic systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 106175.
- López C. I.L., A. Ramírez-Arias & A. Rojano A. (2004). Sensitivity analysis of a dynamic growth model for greenhouse grown lettuce (*Lactuca sativa* L.), *Agrociencia*, 38: 613-624. ISSN: Disponible en: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300976132> (Revisado: Junio del 2023)
- López-C., I. L., Ramirez-Arias, A., & Rojano-Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(2), 257-267. <https://www.redalyc.org/pdf/609/60911211.pdf> (Revisado: Junio del 2023)
- Lara-Izaguirre, A. Y., Rojas-Velázquez, A. N., Romero-Méndez, M. J., Ramírez-Tobías, H. M., Cruz-Crespo, E., Alcalá-Jáuregui, J. A., & Loredó-Ostí, C. (2019). Growth and NO_3^- -accumulation in hydroponic lettuce with nitrate/ammonium ratios in two cultivation seasons. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(1), 21-29. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802019000100021&script=sci_abstract&tlng=en
- Maes, W.H. & Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *J. Exp. Bot.* 63, 695–620 709. ISSN: <https://doi.org/10.1093/jxb/err313> (Revisado: Junio del 2023)
- Marcelis, L .F. M. (1994a). A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of Botany* 74: 43-52. [ISSN: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305736484710924> (Revisado: Junio del 2023)
- Marcelis, L. F. M. (1994b). Fruit and dry matter partitioning in cucumber. PhD Thesis. Wageningen University. Wageningen, The Netherlands. 173 p. ISSN:

<https://search.proquest.com/openview/8402dfa7af69292f4e7893f4c0ef9cb6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y> (Revisado: Junio del 2023)

Marcelis, L.F.M., Heuvelink, E., & Goudriaan, J. (1998). Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74:83-111. ISSN: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423898000831> (Revisado: Junio del 2023)

Mathieu, J., Linker, R., Levine, L., Albright, L., Both, A. J., Spanswick, R., ... & Langhans, R. (2013). Evaluation of the Nicolet model for simulation of short-term hydroponic lettuce growth and nitrate uptake. *Biosystems engineering*, 95(3), 323-337. (Revisado: Junio del 2023)

Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., & Sánchez, R. (2016). A decision support system for managing –131. ISSN: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003> (Revisado: Junio del 2023)

Quispe, E. W. A., Tapia, M. L., Pezoa, A. B., Laguna, O. T., Gonzales, J. W., & Contreras, V. H. E. (2018). Evaluación de la concentración de nitratos, calidad microbiológica y funcional en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. In *Anales Científicos* (Vol. 79, No. 1, pp. 101-110). Universidad Nacional Agraria La Molina.

Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. L., & Ramírez-Arias, A. (2015). *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*: Springer. ISSN: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-11134-6.pdf> (Revisado: Junio del 2023)

Saavedra, G., Corradini, F., & Antúnez, A. (2017). Manual de producción de lechuga. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín INIA N° 374 ISSN 0717 – 4829. ISSN: https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/29500/INIA_Libro_0051.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Revisado: Junio del 2023)

Sánchez-Romero, A., Miranda-Baeza, A., Rivas-Vega, M. E., López-Elías, J. A., Martínez-Córdova, L. R., & Tejeda-Mansir, A. (2016). Development of a model to simulate nitrogen dynamics in an integrated shrimp–macroalgae culture system with zero water exchange. *Journal of the World Aquaculture Society*, 47(1), 129-138.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jwas.12242> (Revisado: Junio del 2023)

Schaible G. & Aillery M. (2012). Water conservation in irrigated agriculture: trends and challenges in the face of emerging demands. Us department agricultura, economic research service. ISSN: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2186555 (Revisado: Junio del 2023)

Schwartz, M. D. (1999). Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 42, 113-118. <https://link.springer.com/article/10.1007/s004840050093> (Revisado: Junio del 2023)

Seginer, I., Buwalda, F. & Straten, G. Van. (1998). Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Horticulturae* 456: 189-197. ISSN: https://www.actahort.org/books/456/456_21.htm (Revisado: Junio del 2023)

Sweeney, D. G.; Hand, D. W.; slack, G. & Thornley, J. H. M. (1981). Modelling the growth of winter lettuce. In: *Mathematics in Plant Physiology*. ROSE, D.A.; CHARLES-EDWARDS, D.A. (Eds.) Academic Press. London. 217-229. ISSN: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10011197303/> (Revisado: Junio del 2023)

Seginer, I., Van Straten, G. & Buwalda, F. (2000). Lettuce growth limited by nitrate supply. *Acta Horticulturae* 507:141-148. ISSN: https://www.actahort.org/books/507/507_16.htm (Revisado: Junio del 2023)

Turner, B. L., Menendez III, H. M., Gates, R., Tedeschi, L. O., & Atzori, A. S. (2016). System dynamics modeling for agricultural and natural resource management issues: Review of some past cases and forecasting future roles. *Resources*, 5(4), 40. ISSN: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/6/889/pdf> (Revisado: Junio del 2023)

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6-13. ISSN: <https://journals.ashs.org/horttech/view/journals/horttech/21/1/article-p6.xml> (Revisado: Junio del 2023)

Van Henten, E. J. (1994a). Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. *Agricultural Systems* 45: 55-72. ISSN:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X94902801>
(Revisado: Junio del 2023)

- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2018). Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment. Academic Press. ISSN: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=IIVwDwAAQBAJ&oi=fnd&Examples+for+Agriculture+and+Environment&ots=g756uugvqV&sig=hxnVDeJApV7XY894pYOeDmSBRFY&redir_esc=y#v=onepage&q=Working%20with%20Dynamic%20Crop%20Models%3A%20Methods%2C%20Tools%20and%20Examples%20for%20Agriculture%20and%20Environment&f=false (Revisado: Junio del 2023)
- Zhang, K., Burns, I. G., & Turner, M. K. (2008). Derivation of a dynamic model of the kinetics of nitrogen uptake throughout the growth of lettuce: calibration and validation. (Revisado: Junio del 2023)

3. PROPUESTA PARA UN MODELO DE CRECIMIENTO DE LECHUGA EN UN SISTEMA ACUAPONICO

Propuesta para un modelo de crecimiento de lechuga en un sistema acuapónico

Ana Cristina Sánchez-Martínez¹, Raquel Salazar-Moreno¹, Joel Pineda-Pineda¹

Mesa 1: Matemáticas y Física

Resumen

La acuaponía es un sistema complejo en el cual se fusionan la acuicultura y la hidroponía. En este ambiente controlado hace posible el uso eficiente del agua y energía, ya que permite obtener en pequeñas superficies, reutilizando agua dos tipos de alimentos vegetal y animal. Sin embargo, en estos sistemas, el reto es mantener las condiciones óptimas en ambos cultivos; peces y plantas, para ello recurrimos a la modelación y simulación, lo cual nos permite conocer el comportamiento del sistema. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo para el crecimiento de lechuga en un sistema acuapónico a pequeña escala. Los resultados obtenidos mostraron que la mayor parte de materia seca, se concentro en la parte aérea de la planta, a partir de los 15 y 20 días después del trasplante, las raíces dejaron de acumular materia seca, alcanzando así su máximo crecimiento y enfocándose al desarrollo de las hojas. En cuanto a la acumulación de nitrógeno, la máxima absorción fue de $18.63 \text{ mmol planta}^{-1}$, lo que indica que se contó con suficiente nitrógeno para el consumo de las plantas. De acuerdo con los resultados obtenidos, la acuaponía brinda los nutrientes necesarios para el desarrollo y crecimiento de lechuga.

Palabras clave: Acuaponía, hidroponía, materia seca, Nitrógeno, lechugas.

Abstract

Aquaponics is a complex system in which aquaculture and hydroponics merge. In this controlled environment, it makes possible the efficient use of water and energy, since it allows to obtain two types of vegetable and animal food on small surfaces, reusing water. However, in these systems, the challenge is to maintain optimal conditions in both crops; fish and plants, for this we resort to modeling and simulation, which allows us to know the behavior of the system. The objective of this work is to develop a model for the growth of lettuce in a small-scale aquaponic system. The results obtained showed that most of the dry matter was concentrated in the aerial part of the plant, from 15 and 20 days after the transplant, the roots stopped accumulating dry matter, thus reaching their maximum growth and focusing on the leaf development. Regarding the accumulation of nitrogen, the maximum absorption was $18.63 \text{ mmol plant}^{-1}$, which indicates that there was enough nitrogen for plant consumption. According to the results obtained, aquaponics provides the necessary nutrients for the development and growth of lettuce.

Keywords: Aquaponics, hydroponics, dry matter, Nitrogen, lettuce.

Introducción

El aumento constante de la población, la disminución de suelos agrícolas y la escasez de agua, que amenazan el abastecimiento de alimentos han generado tecnologías más eficientes para la producción de alimentos como la acuaponía (Pertierra & Quispe, 2020; Aleksić & Vanja, 2020). En México la acuaponía ha adquirido mayor importancia brindando beneficios sociales y económicos, que se han convertido en una fuente de alimentación con un valor nutrimental elevado (Martínez & Leung, 2014). La acuaponía es un sistema complejo no lineal en donde conviven tres especies por esta razón los modelos matemáticos son útiles para el entendimiento de estos sistemas y por ende el mejoramiento de las estrategias para incrementar la eficiencia productiva (Keesman, et al, 2019).

La ciencia de control nos permite hacer uso eficiente de los recursos e incrementar la cantidad y calidad del producto. Dentro del invernadero el crecimiento de los cultivos está influenciado por varios factores tales como; la temperatura exterior, el viento, la humedad, la radiación solar (Noriega et al., 2021). Mediante la implementación de modelos de crecimiento de los cultivos, se ha logrado cumplir el objetivo principal del invernadero que es el de mejorar las condiciones ambientales, para el incremento de la calidad y rendimiento de estos (Toro et al., 2015). Van Henten, (1994) desarrolló una de las aportaciones más importantes de la simulación, control y optimización de los recursos donde aplicó control óptimo a la producción de la lechuga dentro de un invernadero, utilizando un modelo matemático del crecimiento dinámico del cultivo y el coeficiente de transmisividad de la cubierta del invernadero, con el objetivo de reducir el peso de la simulación ya que se utiliza para simular el crecimiento de la lechuga esta serie de Fourier que representa el coeficiente de transmisividad de la luz solar en lugar de un arreglo de valores discretos para la luz solar. Este modelo matemático integra la dinámica del clima dentro de un invernadero, con la dinámica del crecimiento de un cultivo aplicado a la lechuga. Resultando un modelo donde la temperatura del interior del invernadero no solo depende de las condiciones exteriores, también depende de la asimilación de carbohidratos durante el proceso de fotosíntesis del cultivo.

Otros modelos desarrollados combinan la absorción de nitrógeno con la acumulación de materia seca utilizando un enfoque mecanicista de dos compartimentos, que incorpora depósitos estructurales y no estructurales (Bradley et al. 2018). Zhang et al. 2008 y Bradley et al. 2018 encontraron que las predicciones de modelos que incluyen la materia seca dan resultados favorables en la predicción. La materia seca juega un papel importante ya que por medio de este podemos conocer la biomasa, y la cantidad de nutrientes que están disponibles en la planta. Por otro lado, el nitrógeno (N) es uno de los principales nutrientes necesarios para el desarrollo de la planta, su uso en la producción agrícola se ha convertido en contaminante agrícola importante debido a la lixiviación y la escorrentía de fertilizantes. Un reto actual para la investigación agronómica el uso más eficiente del N en la producción, a través la acuaponía se puede reducir el suministro de nitrógeno y otros nutrientes que la planta necesita (Keesman, 2019).

El objetivo de la presente investigación es desarrollar un modelo de crecimiento de lechuga en un sistema acuapónico con Tilapia a pequeña escala, a fin de evaluar el desarrollo de la planta.

Materiales y métodos

La presente investigación se realizó en un invernadero tipo cenital de 20 m de largo por 9 m de ancho, ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo de México. Ubicado a una Latitud 19.8°, Longitud -98.8° y Altitud 2262 m. La temperatura del aire y humedad relativa dentro del invernadero se midió con un sensor HMP60, la radiación fotosintéticamente activa (PAR ($\text{Mm m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)) se midió con un sensor Apogee SQ-520. Los sensores anteriores se conectaron a un Datalogger CR1000X de la marca Campbell. Para el monitoreo de pH, conductividad eléctrica y temperatura del agua, se empleó un sensor GroLine HI981420 de la marca Hanna el cual tiene una precisión de ± 0.05 pH, ± 0.01 mScm-1 y ± 0.5 °C. Los datos se recolectaron cada 15 min, durante todo el ciclo de producción.

Material vegetal

Se trasplantaron 21 plantas de lechuga sangría (*Lactuca sativa*) el 31 de octubre del 2022, bajo un sistema acuapónico de recirculación simple, con una superficie hidropónica de 0.72 m². Cada semana se extrajeron tres plantas al azar, para evaluar su desarrollo, se separó la raíz de la parte aérea y se obtuvo el peso fresco de raíz y hojas, posteriormente se llevó a una mufla a 65 °C hasta que el peso seco se mantuvo constante (Figura 1). La cosecha se realizó a los 31 días después del trasplante es decir el 28 de noviembre. Se obtuvo un total de cinco muestreos.



Figura 3. 1 Materia seca de lechuga sangría.

Modelo de crecimiento de lechuga en solución nutritiva

Bradley et al (2018) desarrolló un modelo del crecimiento de lechuga donde combina la absorción de nitrógeno con la acumulación de materia seca, que incorpora depósitos estructurales y no estructurales como se muestra en la ecuación 1:

$$w = w_S + w_G \quad (1)$$

Donde:

$w_S = \text{Grupo estructural}$

$w_G = \text{Grupo no estructural}$

w_S y w_G se obtienen utilizando las ecuaciones 2 y 3, donde el grupo estructural está conformado por la materia seca de las hojas y tallo de la lechuga, y el grupo no estructural lo conforman las raíces (Bradley et al, 2018):

$$\frac{dw_G}{dt} = \mu_{max} \frac{w_S}{w_S + w_G} c_{q10,\mu}^{(T-20)/10} w_G \quad (2)$$

$$\frac{dw_S}{dt} = \theta P_G - \frac{1}{Y_G} \frac{dw_G}{dt} \quad (3)$$

Los parámetros de este modelo se describen en la Cuadro 3.

La tasa bruta de fotosíntesis del dosel está dada por

$$P_G = A(1 - e^{-kLAI})f(N_{UP}) \frac{\xi I(\sigma C_{CO2} - \beta)}{\xi I + \sigma C_{CO2}} \quad (4)$$

La absorción del nitrógeno se expresa por la siguiente ecuación dinámica (Bradley et al, 2018):

$$\frac{dN_{up}}{dt} = J_{max} \frac{cN}{cN + K} \quad (5)$$

Donde J_{max} limita la absorción de nitrógeno en función de la edad (tamaño del brote), dado por la siguiente ecuación:

$$J_{max} = J_{max,0} e^{-\alpha w} \quad (6)$$

El área foliar total, el área de la planta y el índice de área foliar se expresan en la ecuación (7):

$$LA = -0.25w^2 + 0.072w \quad (7)$$

El si el peso seco es menor a 2.4 , el peso seco (w) se multiplica por 0.02, por el contrario si este es mayor de 2.4 A será igual a 0.0484, como lo muestra en la ecuación (8):

$$A = \begin{cases} 0.02w & w \leq 2.4 \\ 0.0484 & w > 2.4 \end{cases} \quad (8)$$

$$LAI = \frac{LA}{A} \quad (9)$$

Finalmente, $f(N_{up})$ esta dada por

$$f(N_{up}) = \begin{cases} 0 & (N_{up}/w) < 0.02 \\ \frac{100}{3} \left(\frac{N_{up}}{w} - 0.02 \right) & 0.02 \leq \frac{N_{up}}{w} \leq 0.05 \\ 100 & (N_{up}/w) > 0.05 \end{cases} \quad (10)$$

Cuadro 1. Variables de estado para el modelo de crecimiento de lechuga.

Símbolo	Valor inicial	Unidades	Descripción
w	1	g	Total de materia seca de lechuga
w_G	1/3	g	Materia seca no estructural
w_S	2/3	g	Materia seca estructural
N_{up}	0	μmol	Nitrógeno acumulado en el brote (absorción de nitrógeno)

Cuadro 2. Variables manipuladas para el modelo de lechuga

Símbolo	Valor inicial	Unidades	Descripción
T	22	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
I	5×10^6	$\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Radiación PAR
N_{add}	0	Mmol día^{-1}	Nitrógeno en la solución nutritiva

Cuadro 3. Parámetros del modelo de crecimiento de lechuga.

Parámetros	Valor	Unidades	Descripción
θ	0.68	-	Factor para convertir CO_2 en materia seca
$c_{q10,\mu}$	1.6	-	Factor Q_{10} para el crecimiento
k	0.9	-	Coeficiente de extensión
ξ	14×10^{-4}	$\text{g (CO}_2\text{) J}^{-1}$	Eficiencia en el uso de la luz de las hojas
β	0.34/24	$\text{g (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{día}^{-1}$	punto de compensación de CO_2 para tener en cuenta la fotorrespiración
σ	7.2/24	m día^{-1}	Conductancia de la hoja a la difusión de CO_2

Y_G	0.08	-	Eficiencia de conversión
μ_{max}	0.01/24	día ⁻¹	Tasa de crecimiento de saturación a 20°C
C_{CO_2}	0.8	g (CO ₂) m ⁻³	Concentración de CO ₂ en el aire
$J_{max,0}$	0.0374 x 24	Mmol día ⁻¹ g ⁻¹ DM	Valor de J_{max} cuando w=0
α	0.151	g ⁻¹ DM	Coefficiente de J_{max}

El modelo descrito anteriormente se implementó en el software Matlab, teniendo como salida el peso total de materia seca en una planta (w), se simuló los datos cada hora, durante 31 días.

Resultados y discusión

El peso seco total, presentó un incremento progresivo a través del tiempo y alcanzó un máximo de 12 g planta⁻¹ a los 31 días después del trasplante (Figura 2). Que es menor al que reportó Bradley et al (2018) quienes obtuvieron un valor máximo en materia seca de 16 g planta⁻¹, pero son similares a los datos obtenidos por Zhang et al (2008) y Sosa et al (2017).

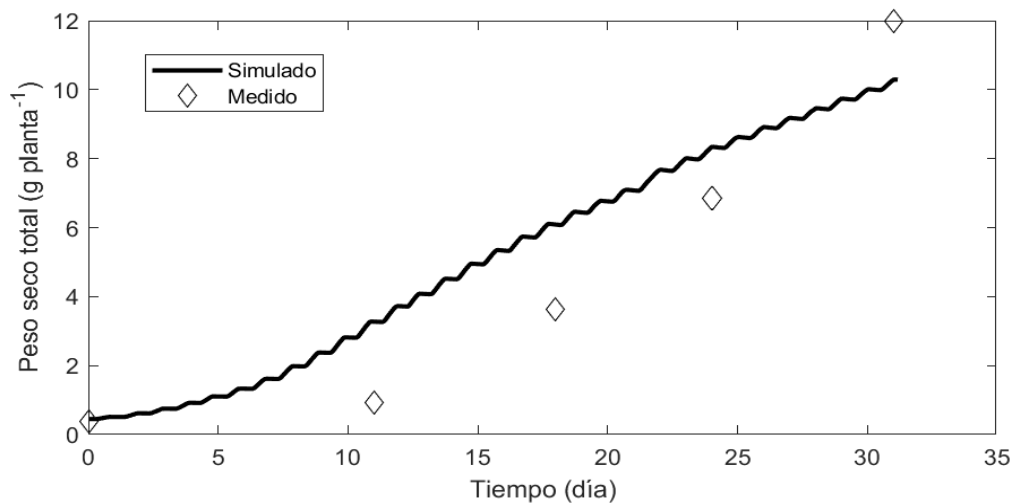


Figura 3. 2 Acumulación de materia seca en lechuga para el primer ciclo de producción

De acuerdo con la Figura 3 se observa que la mayor cantidad de materia seca se tiene en la parte aérea, las raíces alcanzaron su máxima acumulación en los 15 y 20 días después del trasplante, y es cuando la planta comienza a acumular mayor materia seca. Sosa et al (2017) mencionan que con

este desarrollo en la raíz la planta asegura el adecuado suministro de agua y nutrientes en su fase de crecimiento rápido.

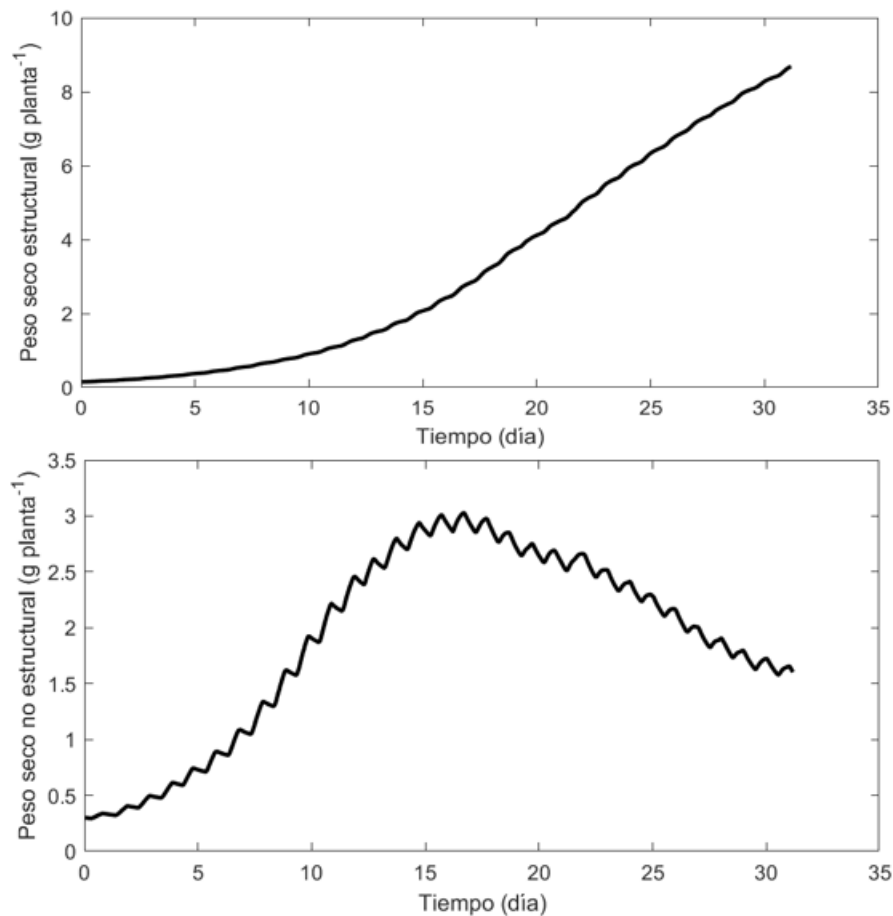


Figura 3. 3 Acumulación de materia seca en la parte estructural (parte aérea) y no estructural (raíz) de la planta de lechuga

El nitrógeno acumulado en la planta durante los primeros 15 días aumento hasta 3 g planta⁻¹, esta acumulación, indica que el sistema ofrece los nutrientes necesarios que la planta necesita. Cuando las plantas son jóvenes, tanto el área foliar total como la cubierta vegetal del suelo aumentan con el tiempo, y el aumento resultante de la capacidad fotosintética crea una mayor demanda de nitrógeno (Zhang et al, 2008). Sosa et al, (2017), reportó una máxima absorción de 18.63 mmol planta⁻¹ a los 35 días de trasplante y de ahí indica un descenso, sin embargo, en este estudio la lechuga siguió acumulando nitrógeno, esto se le puede atribuir a que hay suficientes de nutrientes en un sistema acuapónico.

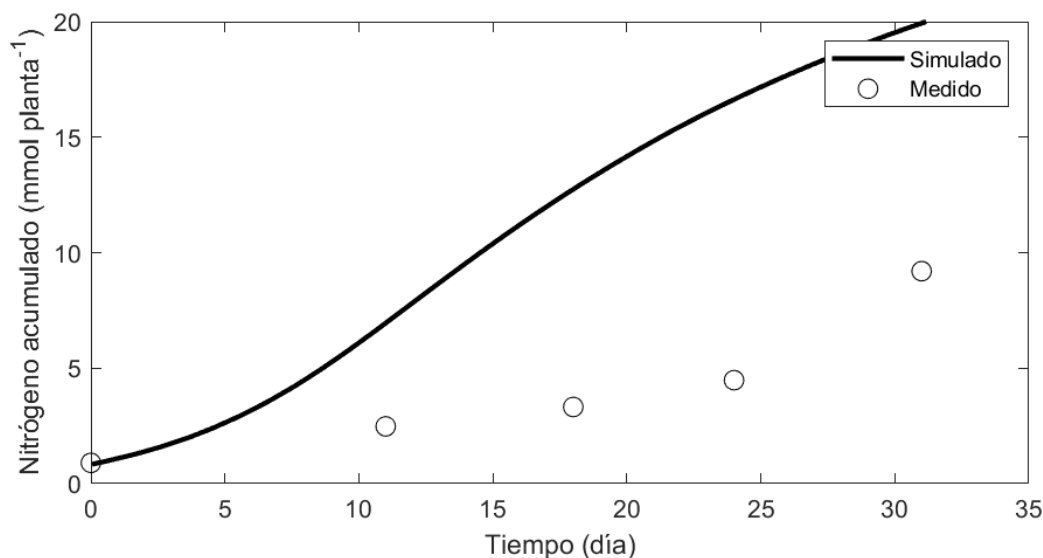


Figura 3. 4 Acumulación de nitrógeno por lechuga.

Conclusiones

La acuaponía es una alternativa para el cultivo de lechugas, que ofrece la aportación del nitrógeno suficiente para el desarrollo de la planta, en este experimento a los 5 días después del trasplante y hasta su cosecha se observó una alta absorción de Nitrógeno por la planta, lo que su a vez permitió un buen desarrollo de este. Lo que reduce la implementación de fertilizantes químicos y por ende la reducción de la contaminación ambiental.

Literatura Citada

Aleksić Natalija, & Šušteršič Vanja. (2020). Analysis of application of aquaponic system as a model of the circular economy: a review. *Reciklaža I Održivi Razvoj*, 13(1), 73–86. <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1820-7480/2020/1820-74802001073A.pdf>.

(Recuperado: julio del 2023)

Bradley, M., Lane, S., & Woodbury, N. (2018). Modeling and Control of an Aquaponics System. http://apmonitor.com/do/uploads/Main/Report_aquaponics2018.pdf. (Recuperado: julio del 2023)

Cohen, M., Somerville, C., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organization of the United Nacion, Rome. <http://www.fao.org/3/ai4021e/index.html>. (Recuperado: julio del 2023)

Edinson, W., Moreno, S., y Zafra, T., A. (2014). Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, Lactucasativa, con efluentes de cultivo de tilapia. REBIOL 2014; 34(2): 60-72, Julio – Diciembre. (Recuperado: julio del 2023)

Falcón, E.; Espinosa, A. (2010). Revista Día Siete 502. MÁS VIDA EN EL DESIERTO, pp 40-47. Recuperado el 27 de abril del 2021 de: http://cmsdata.iucn.org/downloads/mas_vida_en_el_desierto___erick_falcon_es_1.pdf.

González, H., Rubio-Cabrera, S. G., García-Ulloa, M., Montoya-Mejía, M., & Magallón-Barajas, F. J. (2017). Análisis técnico de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía. Agroproductividad, 8(3), 15-19. <https://biblat.unam.mx/hevila/Agroproductividad/2015/vol8/no3/3.pdf>. (Recuperado: julio del 2023)

Graber A., Junge R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination, 246: 147-156. (Recuperado: julio del 2023)

Keesman, K. J., Körner, O., Wagner, K., Urban, J., Karimanzira, D., Rauschenbach, T., & Goddek, S. (2019). Aquaponics Systems Modelling. Aquaponics Food Production Systems, 267. Martínez C., F.J. and Leung, P.S. (2004). Sustainable aquaculture and producer performance: measurement of environmentally adjusted productivity and efficiency of a simple of shrimp farms in Mexico. Aquaculture 241:249-268. (Recuperado: julio del 2023)

Muñoz G., Mario E. (2012), Aquaponic recirculation systems, Informador Técnico (Colombia) Edición 76, Enero - Diciembre 2012, p 123 – 129. (Recuperado: julio del 2023)

Pertierra L., R. y Quispe Gonzabay, J. (2020). Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 31(1):118-130. <http://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>. (Recuperado: julio del 2023)

Reyes Lastiri, D., Geelen, C., Cappon, H. J., Rijnaarts, H. H. M., Baganz, D., Kloas, W., ... Keesman, K. J. (2018). Model-based management strategy for resource efficient design and operation of an aquaponic system. Aquacultural Engineering, 83, 27-39. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.07.001>. (Recuperado: julio del 2023)

Schaible G., Aillery M. (2012). Water conservation in irrigated agriculture: trends and challenges in the face of emerging demands. Us departament agricultura, economic research service. (Recuperado: julio del 2023)

Sosa, A., Ibarra, G. R., Cuevas, J. P., Barra, J. E., Ramos, J. C., & de la Torre, R. R. (2017). Curvas de acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Coolward cultivada en invernadero en México. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 23-28. (Recuperado: julio del 2023)

Stover S. (2015). Lechugas por acuaponia. Hortalizas. Recuperado el 11 de abril del 2021, de <https://www.hortalizas.com/horticultura-protégida/lechugas-por-acuaponia/>. (Recuperado: julio del 2023)

Tap, F. (2000). Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. Wageningen University and Research. (Recuperado: julio del 2023)

4. COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS Y USO EFICIENTE DE NITRÓGENO EN DOS SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Scientific article

YIELD COMPARISON AND EFFICIENT USE OF NITROGEN IN TWO AQUAPONIC SYSTEMS

Ana Cristina **Sánchez-Martínez**¹, Joel **Pineda-Pineda**², Raquel **Salazar-Moreno**^{*1}, Efrén **Fitz-Rodríguez**¹, Irineo Lorenzo **López-Cruz**¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C.P. 56230.

²Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C.P. 56230.

***Corresponding author:** rsalazarm@chapingo.mx

RESUMEN

The fundamental principle of aquaponics is based on the nitrogen cycle, where fish waste ammonium (NH_4^+) is transformed into nitrites and nitrates, which are absorbed by plants. However, when the pH is greater than 7, NH_4^+ becomes ammonia (NH_3), which can be harmful to fish. In this regard, it was proposed to evaluate the effectiveness of two aquaponic systems consisting of a floating raft and a tezontle bedding in transforming ammonium into nitrates. Two production cycles were conducted. During the first cycle, significant differences among treatments were observed in the leaf area index (LAI), yield, and fresh weight of the lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants. In the second cycle, differences were also found in dry weight, width, and length of the leaf (Tukey, $\alpha = 0.05$). The lettuce yields obtained across treatments during the first production cycle were 3.7 and 3.96 kg m⁻², while in the second cycle they increased to 4.05 and 6.8 kg m⁻². Nitrogen use efficiency was 49.05 and 38.13 % in the first cycle and 57.86 and 36.6 % in the second cycle. Tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) yields were 7.36 and 7.413 kg m⁻³. The results indicate that the tezontle bedding system was better in terms of yield and other performance indicators.

Key words: *Lactuca sativa* L., *Oreochromis niloticus* L., nitrates, ammonium, nitrites, leaf area index.

INTRODUCTION

Agriculture faces challenges such as climate change, population growth, and environmental pollution. As one of the leading contributors to environmental degradation, this sector has driven the development of sustainable and eco-friendly production systems. Among these, aquaponics has emerged as a promising approach that enables the efficient use of water, soil, and energy resources (Gonzales *et al.*, 2017). Aquaponics is a type of circular agriculture

Citation: Sánchez-Martínez AC, Pineda-Pineda J, Salazar-Moreno R, Fitz-Rodríguez E, López-Cruz IL. 2025. Yield comparison and efficient use of nitrogen in two aquaponic systems. Agrociencia. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v59i7.3332>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: February 15, 2025.
Approved: October 31, 2025.
Published in Agrociencia:
November 07, 2025.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non- Commercial
4.0 International license.



that involves closed recirculation of water and nutrients (Lennard and Goddek, 2019). This technique is particularly promising in cities, as it can be implemented on a small scale on rooftops, in backyards, and in other small spaces. It also generates sources of proteins, vitamins, and minerals, making it suitable for self-consumption.

Aquaponics integrates aquaculture, which involves the farming of aquatic animals, and hydroponics for the production of vegetables by using the effluent generated in the aquaculture system. The essential components of an aquaponics system are the fish tank, biofilter, and hydroponics unit. The nutrients excreted by the fish or transformed by microbial activity in the fish pond are recirculated throughout the system and assimilated by the plants, while the remaining solid excretions need to be mineralized by microorganisms (Maucieri *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021).

Nitrifying bacteria that adhere to the biofilter convert waste into nutrients. The more surface area the particles have for bacteria to develop, the more efficient the nitrification process will be at converting ammonium into nitrites and then nitrates. Bacteria break down nitrogen compounds such as ammonium (NH_4^+), ammonia (NH_3), and nitrites (NO_2^-). Through the process of nitrification, these compounds are converted into nitrates (NO_3^-), which serve as essential nutrients for plant growth. This bioconversion ensures that harmful nitrogen species are removed from the effluent, preventing fish poisoning while simultaneously providing plants with the nutrients necessary for development (Li *et al.*, 2021; Bautista-Olivas *et al.*, 2021).

The hydroponic unit can consist of a floating raft or a substrate bed. Tezontle beddings are commonly used in greenhouse production due to its favorable physicochemical properties: it is a chemically stable material with a near-neutral pH, provides adequate aeration, and exhibits moisture retention capacity that varies with particle size. At the same time, tezontle acts as a biofilter, thus optimizing the space allocated to the system. However, tezontle beddings are difficult to handle and relatively expensive for larger scales. Furthermore, sediment accumulation may lead to clogging, particularly when fish population densities exceed bed load capacity, requiring separate filtration systems. In addition, higher rates of water evaporation and replacement are often required when using tezontle as a substrate (Millares *et al.*, 2017).

In contrast, the floating raft method utilizes buoyant sheets made of materials, such as expanded polyethylene or plastic, designed to float on the water surface. Holes are drilled into these sheets to hold the plants, allowing their roots to remain in direct contact with the nutrient-rich water throughout the entire production cycle. This continuous exposure ensures a

consistent nutrient supply and promotes uniform plant growth. The floating raft system is widely used in commercial operations and is particularly suitable for leafy crops such as lettuce. Moreover, water loss through evaporation is minimal, reducing the frequency and volume of water replacement required (Li *et al.*, 2021).

Tilapia (*Oreochromis* spp.) is the most commonly used fish species in aquaponic systems due to its relatively short production cycle (six to nine months from hatch to harvest), high tolerance to fluctuations in water quality parameters, and resilience to low dissolved oxygen levels (Gonzales *et al.*, 2017). On the other hand, lettuce (*Lactuca sativa* L.) is one of the most important horticultural crops due to its short growth cycle (around 30 to 40 d under greenhouse conditions) when cultivated at temperatures between 14 and 24 °C and pH between 5 and 6.8 (Moreno-Simón and Zafra-Trelles, 2014). Several lettuce production cycles can be obtained per tilapia production cycle.

Monsees *et al.* (2019) compared an aquaponic system to a conventional hydroponic control for lettuce cultivation and found differences in the number of leaves and leaf area, with a 32 % lower yield in hydroponics compared to the aquaponic system. Bautista-Olivas *et al.* (2021) reported that lettuce grown in a hydroponic system produced higher yields (1.85 kg m^{-2}) than those grown in an aquaponic system (1.08 kg m^{-2}). This difference was attributed to the immediate availability of nutrients in hydroponics through controlled fertilization. However, hydroponics involves higher fertilizer costs and requires technical knowledge for proper nutrient management, while aquaponics is more environmentally friendly and does not rely on external fertilizer inputs.

The objective of this study was to compare the performance, efficiency of nitrogen utilization, and effectiveness of ammonium (NH_4^+) conversion to nitrates (NO_3^-) in two aquaponic systems used for lettuce and tilapia production. Both systems operated under closed recirculation conditions, one employing a floating raft and the other a tezontle substrate bed. The working hypothesis is that tezontle substrate beds in small-scale aquaponic systems increase nutrient availability, promote ammonium conversion to nitrates, and improve plant growth when compared to floating raft systems.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted in a 20 m long and 9 m wide zenithal greenhouse at the Autonomous University of Chapingo (19° 29' 23'' N, 98.8° 53' 37'' W), at an altitude of 2262 m. A randomized experimental design with three replicates was used, incorporating six experimental units and two treatments.

Treatment 1 (T1): Floating raft. This system consists of three main components: a fish tank with a capacity of 150 L, a plant bed with a volume of 75 L measuring $1.2 \times 0.6 \times 0.4$ m, and a biofilter containing red tezontle with dimensions of $0.79 \times 0.5 \times 0.27$ m and a water retention capacity of 55 L to support the nitrification process (Figure 1A).

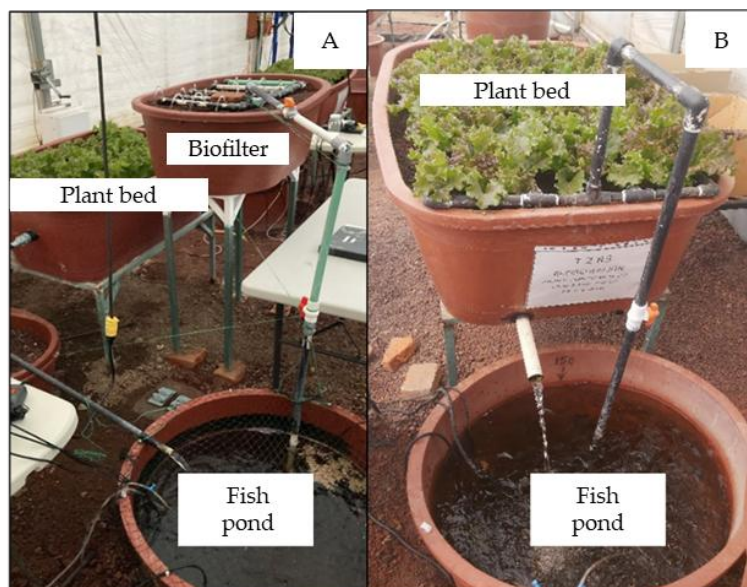


Figure 4. 1 Aquaponic systems used in the study. A: Treatment 1 (T1), floating raft system; B: treatment 2 (T2), tezontle bedding system.

Treatment 2 (T2): Tezontle bedding. This system is a simple recirculating aquaponic setup consisting of a 150-L fish tank and a plant bed measuring $1.2 \times 0.6 \times 0.4$ m filled with red tezontle, which has a water retention capacity of 75 L (Figure 1B).

For effluent circulation, each system was equipped with a $\frac{3}{4}$ -inch PVC pipe and a 0.25 HP submersible pump providing an average flow rate of 2.1 L min^{-1} . A GF-370 air pump with a water pressure of 1600 mm was used to maintain continuous aeration for 24 h in both the floating raft plant bed and the fish tank of each system. The experiment began on October 24, 2022, with 16 tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fish per pond, weighing 158.74 g and measuring 19 cm on average. They were left for a week without lettuce cultivation to allow the systems to stabilize.

On October 31, 21 'Ruby Sky' lettuce seedlings were transplanted into the three replicates of each treatment, for a total of 63 plants per treatment. Harvesting was carried out 28 d after transplanting in both production cycles. The first cycle was harvested on November 28, 2022. The second cycle was transplanted on December 5, 2022, and harvested on January 2, 2023. The fish were harvested 68 d after planting in both treatments.

Throughout the 68-d tilapia production cycle and both lettuce cultivation cycles, weekly monitoring and maintenance activities were conducted to ensure optimal system performance. These activities included fish biometric measurements, plant and water sampling, and daily feeding of the fish with a commercial diet formulated according to recommended nutritional standards (Table 1).

Table 1. Proximate composition and mineral content of the commercial fish feed used during the tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fattening stage.

Feed fattening stage	Protein (%)	Fat (%)	Cu	Fe	Zn	Mn	B	P (%)	N (%)	S (%)
Nutripec® 35/07	35	7	25.0	464.5	283.25	61.0	123.5	1.59	0.36	0.63
Nutripec® 32/06	32	6	27.5	298.5	281.60	57.5	99.5	1.29	0.25	0.36

Cu: copper; Fe: iron; Zn: zinc; Mn: manganese; B: boron; P: phosphorus; N: nitrogen; S: sulfur. Samples were evaluated at the National Laboratory for Agricultural and Forestry Research and Services (LANISAF) at the Autonomous University of Chapingo, Mexico.

Fish biometry

For 10 weeks, 10 fish per pond were randomly selected, placed in a container with water, and their weight and length were recorded. They were then returned to the fish pond.

Fish feeding

The feed amount was determined weekly based on the total fish biomass (Moreno-Simón and Zafra-Trelles, 2014), considering a feeding rate corresponding to 2 % of the tilapia body weight, following FAO (2023) recommendations. The fish were fed twice daily, divided into two equal rations:

$$AF = B \times TA \times d$$

where *AF* represents the amount of feed, *B* is the biomass (g), *TA* is the feed rate (%), and *d* is the number of days.

Feed conversion ratio

The feed conversion ratio (FCR) is an indicator of production costs based on the amount of feed consumed by fish in relation to live weight gain throughout the production cycle. A high FCR value indicates high production costs and is therefore unprofitable. According to Salazar-Murillo *et al.* (2023), the feed conversion ratio is calculated as:

$$FCR = \frac{T_{feed}}{\Delta Biomass}$$

$$\Delta Biomass = B_f - B_i$$

where T_{feed} represents the total feed supplied (kg), B_f is the final biomass (kg), and B_i is the initial biomass (kg).

Growth rate and specific growth rate percentage

According to Moreno-Simón and Zafra-Trelles (2014), the growth rate (GR, cm d⁻¹) and specific growth rate (% GR) are calculated as follows:

$$GR = \frac{L_f - L_i}{T_f - T_i}$$

$$\% GR = \frac{\ln(L_f) - \ln(L_i)}{T_f - T_i}$$

where L_i is the initial length (cm), L_f is the final length (cm), T_i is the initial time (d), and T_f is the final time (d).

Plant sampling

Three plants were randomly selected from each experimental unit, for a total of 18 plants sampled per week, for five weeks. The roots were separated from the base of the stem and leaves. Each sample was measured for leaf length and width, root length, and fresh weight of roots and leaves. A LI-COR LI-3100 leaf area integrator was used to obtain the leaf area. The plant material from each repetition was dried in a Binder 108 ED400 oven at 65 °C for 48 h until a constant dry weight was obtained.

Water sampling

To obtain the ammonium (NH₄⁺), nitrite (NO₂⁻), and nitrate (NO₃⁻) content in the effluent and plant bedding, a water sample (50 mL) was taken from the middle of the fish pond and the outlet of the plant bedding. Every week during the lettuce production cycles, a sample was sent to the National Laboratory for Agricultural and Forestry Research and Services (LANISAF) at the Autonomous University of Chapingo.

Nitrogen use efficiency

Nitrogen use efficiency (NUE) was calculated according to the equation proposed by Yang and Kim (2019):

$$NUE = \left(N_f - \frac{N_u}{N_a} \right) * 100$$

where N_f represents the total nitrogen accumulated in plant tissue at the final harvest (g), N_u is the total nitrogen content in the initial plant tissue (g), and N_a denotes the total amount of nitrogen applied (g).

Statistical analysis

Data were analyzed using mean values obtained from each replicate for all evaluated variables. A one-way analysis of variance (ANOVA) was conducted, and mean differences among treatments were determined using Tukey's *post hoc* test at a significance level of $\alpha = 0.05$. All statistical analyses were performed using Minitab version 19.

RESULTS AND DISCUSSION

Lettuce growth performance

Significant differences ($p \leq 0.05$) were found in most growth parameters between treatments (Table 2), indicating that the tezontle bedding system promoted higher photosynthetic activity and greater biomass accumulation. As a result, increased plant size corresponded with higher dry matter production (Escobar *et al.*, 2020). Overall, this system outperformed the floating raft across both production cycles for the variables evaluated.

Table 2. Comparison of means for different growth parameters of lettuce (*Lactuca sativa* L.) at harvest under two aquaponic systems: T1 (floating raft) and T2 (tezontle bedding) across two production cycles.

System	NL	LL	LW	LA	LAI	FLW	DLW	Yield
		(cm)	(cm)	(cm ²)		(g)	(g)	(g m ⁻²)
First lettuce production cycle (October 31, 2022–November 28, 2022)								
T1	17.0 ^a	18.40 ^a	14.20 ^a	2474.35 ^a	7.22 ^a	135.76 ^a	13.93 ^a	3959.54 ^a
T2	16.0 ^a	17.06 ^a	13.73 ^a	2276.41 ^b	6.64 ^b	126.96 ^b	13.24 ^a	3702.87 ^b
CV (%)	7.44	5.32	2.39	5.89	5.89	4.74	3.61	4.74
Second lettuce production cycle (December 5, 2022–January 2, 2023)								
T	18 ^a	20.30 ^a	16.27 ^a	3596.15 ^a	10.49 ^a	208.46 ^a	18.95 ^a	6079.95 ^a
T2	17 ^a	17.02 ^b	13.98 ^b	2578.58 ^b	7.52 ^b	138.84 ^b	14.24 ^b	4049.63 ^b
CV (%)	5.72	0.12	0.55	12.08	12.08	15.86	12.84	15.86

Means with the same letter in the same column do not represent significant differences according to the Tukey test ($p \leq 0.05$). CV: coefficient of variation. NL: number of leaves; LL:

leaf length; LW: leaf width; LA: leaf area; LAI: leaf area index; FLW: fresh leaf weight; DLW: dry leaf weight.

From the second sampling of the first production cycle, T2 (tezontle bedding) showed a greater number and width of leaves compared to T1 (floating raft). Leaf length in T2 increased significantly 14 d after transplanting and continued to grow until harvest. In the second production cycle, an improvement was observed in all three variables, with T2 consistently outperforming T1.

According to Ahmed *et al.* (2021), increases in leaf area index are influenced by factors such as radiation interception, temperature, water availability, and nutrient supply. In this study, the photosynthetically active radiation (PAR) during the day ranged from 0.14 to 842.45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ with an average of 138.78 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, and the ambient temperature ranged from 5.8 to 31.9 °C with an average of 17.2 °C. The difference between systems was determined by the effluent composition.

Nitrogen is one of the main nutrients affecting plant development (Bautista-Olivas *et al.*, 2021), which can be found in three basic forms: ammoniacal nitrogen, nitrates, and nitrites. However, high levels of ammonium (NH_4^+) and nitrites (NO_2^-) can be toxic to fish and plants (Guzmán-Duchen and Montero-Torres, 2021). However, these compounds remained below 1 mg L^{-1} in both treatments for both production cycles. On the other hand, in aquaponic systems, nitrogen assimilation by plants occurs in the form of nitrates (NO_3^-) and, to a lesser extent, ammonium (NH_4^+) (Benimeli *et al.*, 2019). As NH_4^+ is toxic to plant cells, it is converted into organic compounds.

Plants can assimilate high levels of NO_3^- , which are stored in the metabolic reservoir in the cytoplasm and the storage reservoir in the vacuoles. Some species accumulate more nitrates due to highly efficient absorption, limited reduction capacity, or both (Sallenave, 2016). Nitrogen is highly mobile within the plant, and when supply is insufficient, it is redirected to young leaves, causing chlorosis and reduced yield (Lara-Izaguirre *et al.*, 2019). For fish, high nitrogen waste levels promote pathogens that reduce growth and overall yield (Ornelas-Luna *et al.*, 2017).

The main indicator of aquaponic system performance is the conversion of toxic compounds into plant-available forms, such as NH_4^+ to NO_3^- . In the first lettuce production cycle (weeks 1–5), the floating raft system (T1) had an average NH_4^+ concentration of 0.11 mg L^{-1} in the fish pond. Between weeks five and six, after harvest and without plants, NH_4^+ levels increased in both the pond and growing bed, indicating reduced transformation and lower NO_3^- consumption. This occurs because the absence of plants limits the surface

area for nitrifying bacteria and removes the nitrate consumption gradient that drives nitrification, slowing the nitrogen cycle and reducing biofilter efficiency (Bautista-Olivas *et al.*, 2021). Conversely, in weeks four and five, NO_3^- levels dropped from 140 to 47 mg L^{-1} , reflecting high nitrate uptake during the final growth stage (Figures 2 and 3).

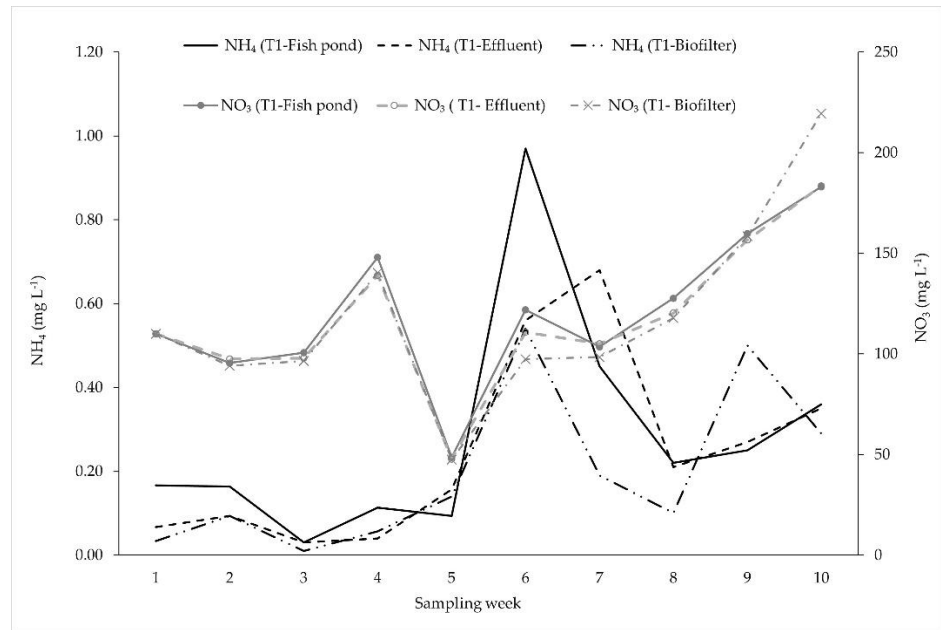


Figure 4. 2 Dynamics of ammonium (NH_4^+) and nitrate (NO_3^-) concentrations in the effluent, fish pond, and biofilter during the tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) production cycle in the T1 (floating raft) system.

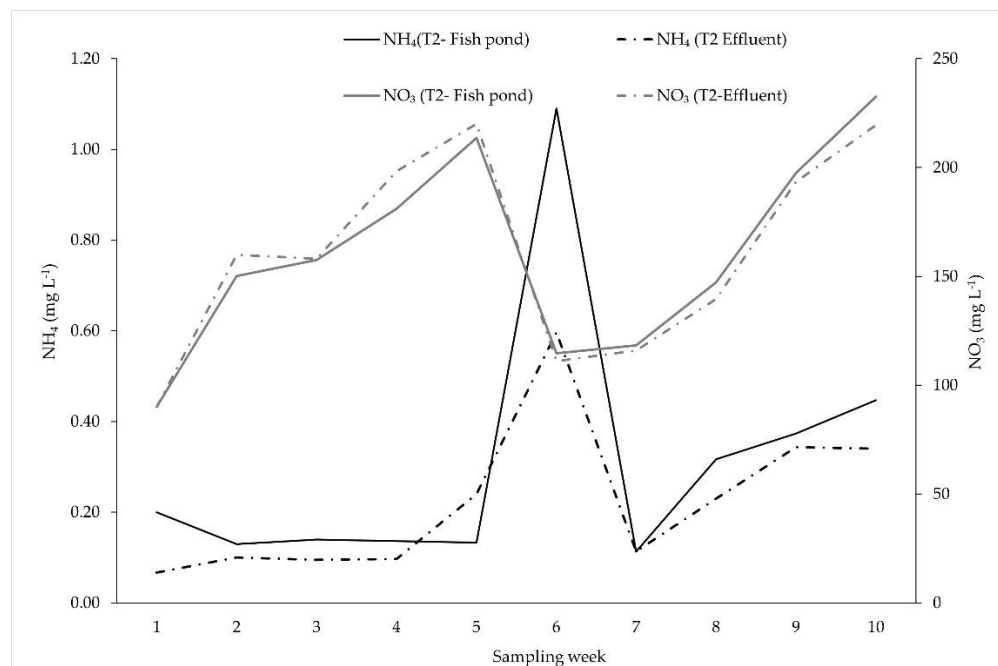


Figure 4. 3 Dynamics of ammonium (NH₄⁺) and nitrate (NO₃⁻) concentrations in the effluent and biofilter during the tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) production cycle in the T2 (tezontle bedding) system.

The initial NO₃⁻ concentrations in the effluent during the first production cycle were 110 mg L⁻¹ for T1 and 90 mg L⁻¹ for T2. By the end of the cycle, these values changed to 47.7 and 220 mg L⁻¹, respectively. A similar trend was observed in the second production cycle, with average NO₃⁻ concentrations of 135.26 mg L⁻¹ for T1 and 173.9 mg L⁻¹ for T2 (Figures 2 and 3).

During the second production cycle, initial NH₄⁺ concentrations in the fish pond were 0.17 mg L⁻¹ for T1 and 0.2 mg L⁻¹ for T2, rising to 0.35 and 0.45 mg L⁻¹ by the end of the harvest. The maximum average NH₄⁺ levels in the effluent for both cycles and treatments remained within recommended limits (<1 mg L⁻¹) (Cohen *et al.*, 2014). The tezontle bedding system supported better microbial development and more efficient nitrification compared to the floating raft.

Tilapia farming

The daily feed conversion rate depends on both the weight and number of fish in the pond (Moreno-Simón and Zafra-Trelles, 2014). This indicator provides a measure of feed efficiency, allowing rations to be adjusted to ensure proper consumption, reduce energy waste, and maximize return on investment. Overfeeding can lead to increased excretion of protein-rich urine and feces, which upon decomposition produce toxic nitrogenous compounds, such as ammonium (FAO, 2023).

An adequate feeding regimen ensures that fish receive the necessary nutrients without overfeeding, which directly affects fish and plant health, water quality, productivity, and overall system profitability. Fish feed represents a major production cost, accounting for approximately 60 % of tilapia production expenses (Zafra-Trelles *et al.*, 2019). The daily feed calculation resulted in an initial weekly feed portion of 355.96 g for T1 and 355.21 g for T2, and a final weekly amount of 511.25 g for T1 and 510.23 g for T2. However, the actual average feed consumed during the production cycle was only 62.31 % for T1 and 63.04 % for T2 of the calculated amounts, indicating relatively low feed intake in both treatments.

Production efficiency was evaluated using the feed conversion ratio (FCR). In this study, FCR values of 1.91 and 1.96 were obtained for T1 and T2, respectively. Although these values fall within the range between 1.39 and 2.14 reported by Zafra-Trelles *et al.* (2019), there is room for improvement, as nearly 2 kg of feed are required to produce 1 kg of tilapia, resulting in higher production costs.

The growth rate (GR) and percentage of specific growth rate per day (% GR) observed in this study were relatively low compared to values of 0.27 and 2.4 % d⁻¹ reported by Hernández-Naranjo *et al.* (2021). Tilapia in T1 showed a slightly higher GR of 0.2 d⁻¹ and % GR of 0.01 % d⁻¹ compared to T2, which had a GR of 0.19 d⁻¹ and % GR of 0.009 % d⁻¹ throughout the production cycle. Overall, both treatments exhibited low specific growth rates.

In the analysis of variance in treatments T1 and T2, no significant differences ($p \leq 0.05$) were found for fish in terms of weight (228.24 and 227.78 g fish⁻¹), length (22.91 and 22.83 cm), and yield (7.41 and 7.36 kg m⁻³). From the initial to the final week, the average weight gain was 69.04 g in T1 and 69.5 g in T2, which is reflected in the yield values. However, fish in T2 showed a slightly better response across the measured variables, likely due to the larger biofilter area in this system, which improved nitrification, nutrient conversion, and overall water quality.

The low tilapia production observed, likely due to reduced feed consumption, can be attributed to factors affecting water quality, including dissolved oxygen (DO), pH, temperature, and concentrations of NH₄⁺, NO₂⁻, and NO₃⁻. Dissolved oxygen remained within optimal levels (6–8 mg L⁻¹), preventing competition for oxygen. According to Aleksić and Šušteršič (2020), a pH range of 6–8.5 is optimal for fish growth and the nitrification process, while nutrient absorption by plants is effective at slightly lower pH values (5.5–7.5). In this study, T1 had an initial pH of 7.85 and a final pH of 6.21, averaging 6.3, whereas T2 ranged from 7.7 to 6.21, with an average of 6.32. Although these

values fall within the optimal range for plant nutrient uptake, they were near the lower limit for tilapia growth in both treatments.

During the first production cycle, average water temperatures in the fish pond were 28.17 °C during the day and 22.3 °C at night, while in the second cycle they averaged 27.19 °C (day) and 21.86 °C (night). According to Sallenave (2016), tilapia require temperatures between 27.8 and 29 °C during winter to achieve optimal growth. Gonzales *et al.* (2017) found that temperature fluctuations can cause behavioral changes in fish, leading to slower growth, reduced feed intake, and altered activity of nitrifying bacteria, which in turn affects nutrient availability and the quality of both lettuce and fish. In this study, suboptimal temperatures occurred only at night, when fish are not feeding, and therefore likely did not significantly impact overall production.

During the tilapia production cycle, NO₂⁻ concentrations in the fish pond for T1 remained at 0.8 mg L⁻¹ during the first three weeks, decreased to 0.47 mg L⁻¹ in week four, and returned to 0.8 mg L⁻¹ by the end of the cycle, resulting in an average concentration of 0.76 mg L⁻¹. In T2, NO₂⁻ levels ranged from 0.23 to 0.47 mg L⁻¹. The maximum average concentrations of NH₄⁺ and NO₂⁻ in the fish pond for both treatments were within the recommended limits reported by Aleksić and Šušteršič (2020) (Table 3).

Table 3. Range of ammonium (NH₄⁺), nitrite (NO₂⁻), and nitrate (NO₃⁻) concentrations in the effluent and fish pond during two lettuce (*Lactuca sativa* L.) production cycles for T1 (floating raft) and T2 (tezontle bedding), compared with recommended values.

(mg L ⁻¹)	Cycle 1		Cycle 2		Recommended values*
	Effluent				
	T1	T2	T1	T2	
Ammonium	0.02–0.16 ^b	0.07–0.24 ^a	0.21–0.68 ^a	0.11–0.60 ^a	<1
Nitrites	0.47–0.80 ^a	0.27–0.47 ^b	0.63–0.80 ^a	0.23–0.47 ^b	<1
Nitrates	47.25–139.05 ^b	90–220.07 ^a	105.07–183.50 ^b	111–219.50 ^a	5–150
	Fish pond				
Ammonium	0.03–0.17 ^b	0.13–0.20 ^a	0.22–0.97 ^b	0.11–1.09 ^a	<1
Nitrites	0.47–0.80 ^a	0.27–0.47 ^b	0.63–0.80 ^a	0.23–0.47 ^b	<1
Nitrates	48.63–147.95 ^b	90–213.60 ^a	103.53–183 ^b	114.67–232.50 ^a	5–150

Means with the same letter in the same row do not represent significant differences according to the Tukey test ($p \leq 0.05$). *Aleksić and Šušteršič (2020)

The maximum nitrate concentration in the nutrient solution in T1 during both production cycles remained above 140 mg L^{-1} , while in T2 the maximum nitrate concentration in the effluent remained above 220 mg L^{-1} . Although nitrate concentrations in T1 stayed within the recommended ranges (Table 3), Sallenave (2016) found that effluent nitrate levels above 90 mg L^{-1} do not pose toxicity risks, as plants can store excess nitrate until needed. The NH_4^+ concentrations in the fish pond over the 10-week tilapia production cycle ranged from 0.17 mg L^{-1} (initial) to 0.36 mg L^{-1} (final) in T1, with a spike to 0.97 mg L^{-1} in week six, coinciding with the absence of plants. In T2, NH_4^+ started at 0.20 mg L^{-1} and increased to 0.45 mg L^{-1} by the end of the cycle, showing a similar peak of 1.09 mg L^{-1} in week six.

In terms of nitrogen use efficiency (NUE), the values obtained in this study were similar to those reported by Zou *et al.* (2016), who found efficiencies of 53.3 and 56.6 % in aquaponic systems supplemented with nitrifying bacteria, highlighting enhanced bacterial activity in nitrogen transformation. The results also exceeded those reported by Yang and Kim (2019), who recorded a NUE of 30.7 % when evaluating three feeding strategies (progressive, intermediate, and uniform). In their study, feeding rates were below optimal levels for maintaining suitable water quality and fish growth: the progressive feeding strategy increased feed proportionally to fish weight, the intermediate increased it by 0.7 %, and the uniform treatment maintained a constant feed rate throughout the production cycle.

In this study, maximum NUE values of 57.2 % were obtained for T1 and 46.95 % for T2 during the first production cycle, while values of 57.86 and 36.86 % were recorded for the second cycle, respectively. These results indicate superior performance for the T1 system in both production cycles. According to Zou *et al.* (2016), higher NUE values are typically associated with greater abundance and activity of nitrifying bacteria, which are favored by increased oxygen availability. Similarly, Yang and Kim (2019) reported that uniform feeding enhances nutrient availability, improves water quality, and consequently increases plant quality and yield. In the present study, feed quantities were calculated based on fish biomass; however, actual feed consumption was slightly lower than the estimated amount.

Lettuce yields during the first production cycle were higher in T2 (3.96 kg m^{-2}) compared to T1 (3.7 kg m^{-2}) (Figure 4A). Similarly, in the second production cycle (Figure 4B), T2 achieved a higher yield (6.08 kg m^{-2}) than T1 (4.05 kg m^{-2}), indicating a more efficient nitrification process and enhanced nitrate

uptake in the T2 system (Table 2). Although plants exhibited satisfactory growth and development in both treatments, the superior performance of T2 suggests greater nitrate absorption and improved nitrogen use efficiency. According to Lara-Izaguirre *et al.* (2019), nitrogen is a key element regulating plant growth and development, primarily assimilated in the form of nitrates.

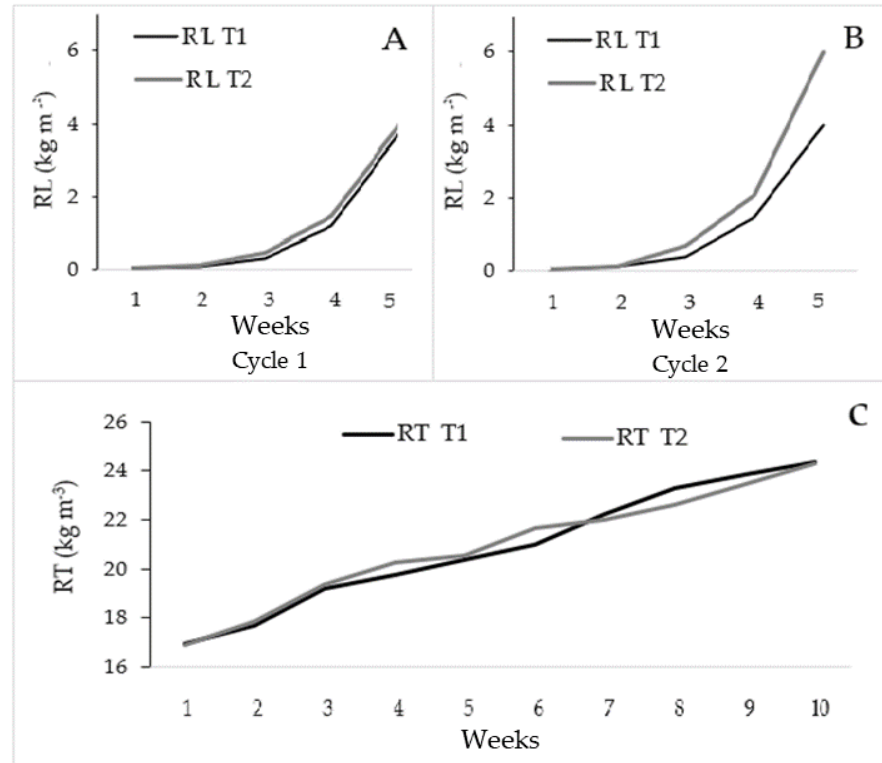


Figure 4. 4 A: Lettuce (*Lactuca sativa* L.) yield (RL) in the first production cycle; B: Lettuce yield (RL) in the second production cycle; C: Tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) yield (RT) over the whole production cycle.

The lettuce yields obtained in both treatments in this study were higher than those reported by Jordan *et al.* (2018) for a hydroponic system (2.88 kg m⁻²). Similarly, Bautista-Olivas *et al.* (2021) found a lettuce yield of 1.85 kg m⁻² for hydroponic and 1.08 kg m⁻² for aquaponic conditions, managed a biomass of 1.5 kg m⁻³ in fish, and 19 lettuces per m². In contrast, Jordan *et al.* (2018) obtained better results in hydroponics, which was due to the use of fertilizers in the nutrient solution and the elevated ambient temperatures during the experimental period (June–July). These conditions likely increased thermal stress on the fish, reducing feed intake and consequently lowering the organic load in the nutrient solution, which limited nutrient availability for plants.

Lennard and Goddek (2019) compared lettuce growth under hydroponic and aquaponic systems across different seasons (summer, winter, and spring),

using a density of 15 plants per m². In all cases, lettuce performance in the aquaponic system was comparable to that in the hydroponic system. However, during winter, the hydroponic setup yielded better results due to reduced fish feeding activity and lower water temperatures, which limited nutrient availability in the aquaponic system. Similarly, Barbosa *et al.* (2020) evaluated an aquaponic system to compare tilapia and lettuce yields under varying fish tank volumes, with an initial fish biomass of 4 kg m⁻³ and 19 lettuce plants per m². They found no significant differences in lettuce yield or fish performance among the treatments, which may be due to consistent water quality and uniform fish stocking density across systems. In this work, the increase in tilapia biomass throughout the production cycle rose from 16.93 to 24.29 kg m⁻³ in T1 and 24.34 kg m⁻³ in T2 (Figure 4C).

The weight and biomass of vegetables depend on several factors, including the type of substrate used in aquaponic cultivation, the season, the type of aquatic organism produced in aquaponics, and the quantity and quality of the feed (Barbosa *et al.* 2020). The pH of the water, electrical conductivity, ammonium, dissolved oxygen, and water temperature must also be controlled, as these factors directly affect the nutrient solution and influence the development of fish and plants (Cohen *et al.*, 2014). The yields obtained in this study for both tilapia and lettuce were compared with those reported by other authors (Table 4). Among the treatments evaluated, T2 (tezontle bed) demonstrated the best overall performance.

Table 4. Comparative yields of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) obtained in this study and reported by other authors under different production systems and environmental conditions.

Author	Production system	Location	Yields	
			Lettuce (kg m ⁻²)	Tilapia (kg m ⁻³)
Lennard and Goddek (2019)	Aquaponics	Australia	5.77	-
	Hydroponics		5.46	
Jordan <i>et al.</i> (2018)	Aquaponics	Brazil	2.58	-
	Hydroponics		2.88	
Barbosa <i>et al.</i> (2020)	Aquaponics	Brazil	1.62	4.44
			1.42	4.88
Bautista-Olivas <i>et al.</i> (2021)	Aquaponics	Mexico	1.08	-

	Hydroponics				1.85	
This study (2022–2023)	Aquaponics	Mexico	1st cycle	T1	3.70	7.36
				T2	3.96	7.41
			2nd cycle	T1	4.05	
				T2	6.80	

CONCLUSIONS

The results showed that the tezontle bed is the most effective alternative for small-scale aquaponic systems, as it promotes nutrient availability, the conversion of ammonium to nitrates, and superior vegetable growth compared to the floating raft system, thus partially confirming the proposed hypothesis. In contrast, the floating raft treatment required additional nutrients and a more efficient biofilter to achieve optimal nitrogen transformation and system stabilization, limiting its productive performance.

The separation of the biofilter from the growing bed in the floating raft system reduced nitrate availability and leaf area development. For the aquaculture component, fish growth, weight, and survival did not differ significantly between treatments; however, fluctuations in water pH affected overall performance, showing the importance of continuous monitoring to ensure balanced conditions for both fish and plants.

Although the floating raft treatment had higher nitrogen use efficiency, it did not result in increased biomass accumulation, suggesting possible nitrogen retention in plant tissues and incomplete transformation for growth. Future studies should examine nitrogen assimilation and accumulation dynamics to optimize nutrient utilization and enhance the integrated productivity of aquaponic systems.

REFERENCES

- Ahmed ZF, Alnuaimi AK, Askri A, Tzortzakakis N. 2021. Evaluation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) production under hydroponic system: Nutrient solution derived from fish waste vs. inorganic nutrient solution. Horticulturae 7 (9): 292. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090292>

- Aleksić N, Šušteršič V. 2020. Analysis of application of aquaponic system as a model of the circular economy: A review. *Recycling and Sustainable Development* 13 (1): 73–86. <https://doi.org/10.5937/ror2001073A>
- Barbosa PTL, Povh JA, Silva ALN, Ventura AS, Stringhetta GR, Laice LM, de Oliveira AF, de Carvalho TA, Correa Filho RAC. 2020. Performance of Nile tilapia and vegetables grown in different aquaponic volumes. *Journal of Agricultural Studies* 8 (4): 497–506. <https://doi.org/10.5296/jas.v8i4.17598>
- Bautista-Olivas AL, Fernández DR, Álvarez-Chávez CR, Mexia-Sánchez AC, Mendoza-Cariño M, García-Cabello K. 2021. Productividad de la lechuga (*Latuca Sativa* L.) en acuaponía e hidroponía. *European Scientific Journal* 17 (21): 283. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n21p283>
- Benimeli MF, Plasencia A, Corbella R, Guevara DA, Sanzano A, Sosa F, de Ullivari JF. 2019. El nitrógeno del suelo. Cátedra de Edafología. Facultad de Agronomía y Zootecnia Universidad Nacional de Tucumán: Tucumán, Argentina. 11 p.
- Cohen, M., Somerville, C., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome. Recuperado el 27 de abril del 2021 de <http://www.fao.org/3/ai4021e/index.html>.
- Escobar-Bahamondes P, Etcheverría TP, Vial AM, Daza CJ. 2020. Concepto de materia seca y su uso: guía práctica. Informativo INIA Carillanca 119.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2023. Tabla 27. Tabla de alimentación para tilapia utilizando alimentos formulados para cultivo semi-intensivo en estanque. Rome, Italy. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/affris/docs/NileTilapiaSpanishTables/NileTilapiaTabSp27.pdf (Retrieved: July 2023).
- González, H., Rubio-Cabrera, S. G., García-Ulloa, M., Montoya-Mejía, M., & Magallón-Barajas, F. J. (2017). Análisis técnico de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía. *Agroproductividad*, 8(3), 15-19. Recuperado en 11 de abril del 2021, de <https://biblat.unam.mx/hevila/Agroproductividad/2015/vol8/no3/3.pdf>.

- Guzmán-Duchen D, Montero-Torres J. 2021. Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales* 8 (2): 87–101. <https://doi.org/10.53287/uyxf4027gf99e>
- Hernández-Naranjo R, Neri-Ramírez E, Astudillo-Sánchez CC, Delgado-Martínez R, Rivera-Ortíz P, González-Alanís P, de la Luz Vázquez-Sauceda M. 2021. Producción de lechuga (*Lactuca sativa*) irrigada con efluentes de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 8 (2): 69–76.
- Jordan RA, Ribeiro EF, de Oliveira FC, Geisenhoff LO, Martins EAS. 2018. Yield of lettuce grown in hydroponic and aquaponic systems using different substrates. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 22 (8): 525–529. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p525-529>
- Lara-Izaguirre AY, Rojas-Velázquez AN, Romero-Méndez MJ, Ramírez-Tobías HM, Cruz-Crespo E, Alcalá-Jáuregui JA, Loredó-Ostí C. 2019. Growth and NO₃-accumulation in hydroponic lettuce with nitrate/ammonium ratios in two cultivation seasons. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42 (1): 21–29.
- Lennard W, Goddek S. 2019. Aquaponics: The basics. *In* *Aquaponics Food Production Systems*. Springer: Cham, Switzerland, pp: 113–143. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5
- Li, H., et al (2021). Método de sensor virtual basado en filtrado adaptativo para la estimación del nitrógeno total en sistemas acuapónicos. *Computers and Electronics in Agriculture* , 186 , 106175. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106175>
- Maucieri C, Nicoletto C, Junge R, Schmautz Z, Sambo P, Borin M. 2018. Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy* 13 (1): 1012. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Millares N, Pérez L, Ceballos BJ, Flores ER, Isla M. 2017. Un método alternativo para incrementar la productividad en el cultivo acuícola-agrícola en proyectos comunitarios con enfoque de género: la acuaponía. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 34 (2): 84–89.
- Monsees, H., Suhl, J., Paul, M., Kloas, W., Dannehl, D., Würtz, S., & Islam, R. (2019). Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse

gas emissions by saving inorganic fertilizer. *Plos One*, 14(6).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218368>

Moreno-Simón EW, Zafra-Trelles A. 2014. Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactuca sativa*, con efluentes de cultivo de tilapia. *REBIOL* 34 (2): 60–72.

Ornelas-Luna R, Aguilar-Palomino B, Hernández-Díaz A, Hinojosa-Larios JÁ, Godínez-Siordia DE. 2017. Un enfoque sustentable al cultivo de Tilapia. *Acta universitaria*, 27 (5): 19–25.
<https://doi.org/10.15174/au.2017.1231>

Salazar-Murillo L, Chacón-Villalobos A, Herrera-Muñoz JI. 2023. Crecimiento, eficiencia y composición de tilapia (*Oreochromis aureus*) alimentada con lombriz roja (*Eisenia fetida*). *Nutrición Animal Tropical* 17 (1): 1–35.

Sallenave R. 2016. Important water quality parameters in aquaponics systems. College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences, New Mexico State University. Las Cruces, NM, USA.

Yang T, Kim HJ. 2019. Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Scientia Horticulturae* 256: 108619.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>

Zafra-Trelles AM, Díaz-Barboza ME, Dávila-Gil FA, Fernández-Chumbe RE, Vela-Alva KA, Guzmán-Santiago HH. 2019. Conversión y eficiencia alimenticia de *Oreochromis aureus* var. suprema (Cichlidae) con diferente alimento balanceado en sistema cerrado, Trujillo, La Libertad, Perú. *Arnaldoa* 26 (2): 815–826.

Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Liang S, Wang J, Yan R. 2016. Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation. *Environmental Science and Pollution Research* 23 (7): 6671–6679. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5898-0>

5. MODELACIÓN DE NITRÓGENO EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO CON CULTIVO DE LECHUGA Y TILAPIA

Resumen

Ante la creciente necesidad de incrementar la producción de alimentos bajo criterios de sostenibilidad, los sistemas acuapónicos han adquirido especial relevancia por su capacidad para optimizar recursos y reducir impactos ambientales. Para la comprensión y mejora de los sistemas acuapónicos se requieren del uso de modelos dinámicos capaces de describir los procesos biológicos, físicos y químicos asociados a la dinámica del sistema. La información generada en el cuarto capítulo de tesis se utilizó en la construcción de un modelo dinámico de flujo de nitrógeno, cuyo análisis de sensibilidad global realizado mediante el método SAFE permitió identificar los parámetros más importantes, asimismo se realizó la calibración del modelo a fin de optimizar los valores de los parámetros. El modelo calibrado mostró un desempeño satisfactorio al simular el contenido de nitrógeno en el sistema y la acumulación de materia seca en las plantas. En conjunto, ambos estudios evidencian que la aplicación de modelos dinámicos, acompañada de análisis de sensibilidad y calibración, constituye una herramienta fundamental para mejorar la eficiencia energética y nutricional en sistemas de producción sostenible. Estas aproximaciones permiten no solo explicar el comportamiento de sistemas complejos, sino también optimizar su funcionamiento en escenarios reales de agricultura sustentable.

Palabras clave: Análisis de sensibilidad, calibración, acuaponía, nutrición.

Introducción

La creciente demanda global de alimentos ha impulsado la búsqueda de sistemas de producción más sostenibles y eficientes. En este contexto, la acuaponía se ha consolidado como una alternativa prometedora al integrar el cultivo de peces y plantas en un sistema de recirculación que aprovecha los residuos nitrogenados y reduce el impacto ambiental (Aleksić & Šušteršič, 2020; Lennard & Goddek, 2019). Su funcionamiento depende de la interacción entre peces, bacterias nitrificantes y plantas, donde el amonio excretado por los peces es transformado en nitrito y posteriormente en nitrato, permitiendo su absorción vegetal y el mantenimiento de la calidad del agua (Guzmán Duchén & Montero Torres, 2021; Zou *et al.*, 2016).

Uno de los factores más determinantes en el desempeño de un sistema acuapónico es la eficiencia con la que se transforma y aprovecha el nitrógeno. Estudios recientes señalan que variables como la tasa de alimentación, la actividad microbiana y el tipo de sustrato modifican significativamente la disponibilidad de nitrógeno y, por ende, el crecimiento vegetal y la salud del pez (Yang & Kim, 2019; Maucieri *et al.*, 2018).

La complejidad de estos sistemas ha impulsado el desarrollo de modelos matemáticos capaces de representar los procesos biológicos y físico-químicos involucrados. Los modelos dinámicos de cultivos permiten analizar el crecimiento vegetal bajo diferentes condiciones de manejo y disponibilidad nutrimental, integrando procesos relacionados con el índice de área foliar, la acumulación de biomasa y la absorción de nutrientes (Marcelis *et al.*, 1998; Heuvelink, 2018). Entre los más conocidos se encuentran los modelos propuestos por Sweeney *et al.* (1981), Seginer *et al.* (1998), Zhang *et al.* (2008) y Körner *et al.* (2007), diseñados principalmente para hidroponía y agricultura protegida. Sin embargo, su aplicación directa en acuaponía es limitada debido a que la composición del agua y la dinámica del nitrógeno son más variables que en condiciones hidropónicas controladas (Tyson *et al.*, 2011; Delaide *et al.*, 2016).

Debido a la complejidad de los sistemas acuapónicos donde interactúan peces, plantas y microorganismos, los modelos que consideran explícitamente los flujos de nitrógeno han adquirido mayor relevancia. Un ejemplo representativo es el modelo propuesto por

Li *et al.* (2021), que combina un enfoque mecanicista para peces con un modelo empírico polinómico para plantas e incorpora un módulo de absorción de nitrógeno. Este tipo de modelos permite predecir el crecimiento simultáneo de organismos y la dinámica temporal del amonio, nitrito y nitrato, proporcionando una herramienta para analizar el desempeño del sistema bajo distintas condiciones de manejo.

La composición del agua, la presencia de microorganismos y la variabilidad en la disponibilidad del nitrógeno pueden modificar significativamente la respuesta fisiológica de las plantas (Wallach *et al.*, 2014). En consecuencia, es necesario calibrar y validar los modelos bajo condiciones específicas de sistemas acuapónicos reales, para lograr un ajuste adecuado sin perder capacidad predictiva (Pianosi *et al.*, 2016). Este proceso implica ajustar los parámetros más relevantes del modelo con datos observados, debido a que muchos de ellos no pueden medirse directamente (Wallach *et al.*, 2014). En los últimos años, se han aplicado métodos avanzados de optimización y calibración incluyendo algoritmos evolutivos, algoritmos genéticos y evolución diferencial para mejorar el ajuste de modelos de cultivos y sistemas acuícolas (Ma *et al.*, 2020; Loucks & van Beek, 2017). Estas herramientas permiten explorar espacios de parámetros complejos, reducir la incertidumbre de las predicciones y mejorar la confiabilidad de los modelos en escenarios de manejo variables.

Dado lo anterior, es necesario evaluar el comportamiento del modelo bajo condiciones acuapónicas reales y determinar los parámetros que requieren ajuste para mejorar la representación del crecimiento vegetal y el uso de nitrógeno. Por ello, los objetivos de este estudio fueron: (1) implementar el modelo de Li *et al.* (2021) para las condiciones específicas del experimento desarrollado en el capítulo 4; (2) realizar un análisis de sensibilidad global para identificar los parámetros más influyentes del modelo, y (3) calibrar el modelo utilizando algoritmos genéticos para representar adecuadamente el crecimiento y la absorción de nitrógeno en el modelo acoplado de Li *et al.* (2021) y Zhang *et al.* (2008).

Materiales y métodos

La presente investigación se realizó en un invernadero tipo cenital de 20 m de largo por 9 m de ancho, ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo de México. El experimento dio inició el 24 de octubre del 2022, con 16 tilapias por estanque con un peso promedio de 158.74 g por pez y una longitud promedio de 19 cm. Durante los 68 días del ciclo de producción de tilapia y los dos ciclos de lechuga se llevaron a cabo actividades semanales para el control y mejoramiento de los sistemas, que incluyeron: biometrías en peces, muestreos en plantas, muestreo de agua y alimentación diaria de peces. Para la obtención del contenido de amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) en el efluente y cama de plantas se envió una muestra de agua (50 ml) semanalmente al laboratorio de LANISAF (Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal, Universidad Autónoma Chapingo) para su respectivo análisis, las actividades se describieron a detalle en el Capítulo 4.

La temperatura del aire y humedad relativa dentro del invernadero se midió con un sensor HMP60, la radiación fotosintéticamente activa (PAR ($\text{Mm m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)) con un sensor Apogee SQ-520. Los sensores anteriores se conectaron a un Datalogger CR1000X de la marca Campbell. Para el monitoreo de pH, conductividad eléctrica y temperatura del agua, se empleó un sensor Groline HI981420 de la marca Hanna el cual tiene una precisión de ± 0.05 pH, ± 0.01 mScm $^{-1}$ y ± 0.5 °C. Los datos se recolectaron cada 15 min, durante todo el ciclo de producción.

Descripción del Modelo de peces y cultivo

El modelo mecanicista desarrollado por Li *et al.* (2021) está conformado por cuatro ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del sistema: la biomasa de los peces, el contenido de nitrógeno en el estanque de cultivo, el contenido de nitrógeno en la cama de plantas y la cantidad total de alimento consumido. Para representar de manera más precisa la dinámica del nitrógeno en la fase vegetal, dentro de la ecuación diferencial correspondiente se integró el modelo dinámico propuesto por Zhang *et al.* (2008). En este modelo, la tasa de absorción de nitrógeno depende tanto de la concentración disponible como del peso seco de la planta, lo que permite sustituir la función polinómica originalmente empleada por Li *et al.* (2021)

La integración de ambos modelos dio lugar a un modelo acoplado más robusto, el cual describe de manera simultánea la biomasa de los peces, la dinámica del nitrógeno en el estanque de peces, la absorción de nitrógeno por las plantas y la acumulación de biomasa vegetal. Como resultado, el sistema completo quedó conformado por siete ecuaciones diferenciales (Cuadro 1).

Cuadro 2 Descripción de las variables de estado del sistema

Estado	Unidades	Descripción
FB	$kcal\ pez\ sistema^{-1}$	Biomasa total de peces en el sistema
C_{NF}	$g\ m^{-3}$	Concentración de nitrógeno en el estanque de peces
C_{NP}	$g\ m^{-3}$	Concentración de nitrógeno en la cama de plantas
G_f	g	Total de alimento para peces
w	g	Total de materia seca de lechuga
w_G	g	Materia seca no estructural
w_S	g	Materia seca estructural
N_{up}	μmol	Nitrógeno acumulado en el brote (absorción de nitrógeno)

El modelo dinámico del sistema acuapónico se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dFB}{dt} = FA - FC - FP * k_{m2} * FB_m \quad (1)$$

$$\frac{dG_f}{dt} = \frac{(1-\alpha)*FAPP}{FED} \quad (2)$$

$$\frac{dC_{NF}}{dt} = \frac{1}{V_{tanq}} * FAPP * PE * p_1 * \left(\frac{p_2}{p_3} + a \right) - k_{nl} * C_{NF} - \frac{F_i C_{NF}}{V_{tanq}} + \frac{F_i C_{NP}}{V_{tanq}} \quad (3)$$

Ecuación de Li et al (2021) sin modificar

$$\frac{dC_{NP}}{dt} = \frac{F_i C_{NF}}{V_{cp}} - \frac{F_i C_{NP}}{V_{cp}} - PN * \frac{DW(p_4 \ln C_{NP} + P_5)}{V_{cp}}$$

Se modifico la ecuación (4) Incorporando el modelo de Zhang et al. (2008)

$$\frac{dC_{NP}}{dt} = \frac{F_i C_{NF}}{V_{cp}} - \frac{F_i C_{NP}}{V_{cp}} - PN * \frac{Nup}{V_{cp}} \quad (4)$$

Modelo del crecimiento de lechuga donde se combina la absorción de nitrógeno con la acumulación de materia seca, que incorpora depósitos estructurales y no estructurales (Zhang *et al.*, 2008):

$$\frac{dw_G}{dt} = \mu_{max} \frac{w_S}{w_S + w_G} C_{q10, \mu}^{(T-20)/10} w_G \quad (5)$$

$$\frac{dw_S}{dt} = \theta P_G - \frac{1}{Y_G} \frac{dw_G}{dt} \quad (6)$$

La absorción del nitrógeno se expresa por la siguiente ecuación dinámica (Bradley *et al.*, 2018):

$$\frac{dN_{up}}{dt} = J_{max} \frac{cN}{cN + K} \quad (7)$$

La variación diaria de la biomasa total de peces (FB) en el sistema (ecuación 1). Donde km_2 (número·día⁻¹) representa la tasa de mortalidad, para esta investigación la mortalidad fue de cero, mientras que FP (número·sistema⁻¹) indica la población total de peces. La biomasa media por pez, expresada como FBm (kcal·pez⁻¹), se determina a partir de la ecuación (8). FA (kcal·alimento·día⁻¹·sistema⁻¹) define la tasa de anabolismo diario, obtenida mediante la ecuación (9).

$$FB_m = \frac{FB}{FP} \quad (8)$$

Anabolismo total diario de los peces (kcal alimento (día*sistema)⁻¹).

$$FA = k_{maxa} * TFC * f(FQ) \quad (9)$$

La influencia de la calidad del alimento en el anabolismo de los peces se obtiene de la siguiente forma:

$$f(FQ) = e^{-k_{PE} * \left[\frac{PE_{opt} - PE}{PE_{opt} - PE_{min}} \right]^{\bar{p}}} \quad (10)$$

El apetito total diario de los peces se obtiene con la siguiente ecuación (kcal alimento (día*sistema)⁻¹).

$$FAPP = FAPP_{max} * FB * f_{sm} * f(WQ) \quad (11)$$

Donde:

$$f(WQ) = 1$$

Efecto del tamaño del pez en el consumo de alimento

$$f_{sm} = \left(\frac{FB_m}{FB_s} \right)^m \quad (12)$$

Catabolismo total diario (energía usada en funciones vitales y mantenimiento) (kcal alimento (día*sistema)⁻¹)

$$FC = TFC * k_{alim} + FB * k_{fast} * f_{sn} * f_2(DO) * f_3(T) \quad (13)$$

Donde:

$$f_2(DO) = 1$$

efectos del tamaño del pez en el catabolismo

$$f_{sn} = \left(\frac{FB_m}{FB_s} \right)^n \quad (14)$$

efectos de la temperatura del agua en el catabolismo

$$f_3(T) = c + dT \quad (15)$$

La ecuación (2) caracteriza la dinámica del contenido de nitrógeno en el estanque de peces. El parámetro p_1 (adimensional) corresponde al porcentaje de nitrógeno en la proteína. Con base en los resultados reportados por Montanhini Neto y Ostrensky (2015),

$p_2 = 0.47$ representa la fracción del nitrógeno total que es excretado por los peces, equivalente al 47% del nitrógeno presente en el alimento. El parámetro $p_3 = 0.78$ indica que los peces consumen el 78% del alimento suministrado. El parámetro a (adimensional) cuantifica la contribución del alimento no ingerido al nitrógeno total, y se determina mediante la Ecuación (16).

$$a = \frac{b}{1-b} \quad (16)$$

La ecuación (3) describe la variación de la concentración de nitrógeno en la cama de plantas y se adapta al modelo de Zhang *et al.* (2018) que se describe a continuación:

$$DW = \text{Peso seco de la planta} \quad (19)$$

$$w = w_S + w_G \quad (20)$$

Donde:

$w_S = \text{Grupo estructural}$

$w_G = \text{Grupo no estructural}$

w_S y w_G se obtienen utilizando las ecuaciones 5 y 6, donde el grupo estructural está conformado por la materia seca de las hojas y tallo de la lechuga, y el grupo no estructural lo conforman el reservorio metabólico (Bradley *et al.*, 2018).

La tasa bruta de fotosíntesis del dosel está dada por

$$P_G = A(1 - e^{-kLAI})f(N_{UP})\frac{\xi I(\sigma C_{CO_2} - \beta)}{\xi I + \sigma C_{CO_2}} \quad (21)$$

Donde J_{max} limita la absorción de nitrógeno en función de la edad (tamaño del brote), dado por la siguiente ecuación:

$$J_{max} = J_{max,0}e^{-\alpha w} \quad (22)$$

El área foliar total, el área de la planta y el índice de área foliar que están dados por:

$$LA = -0.25w^2 + 0.072w \quad (23)$$

$$A = \begin{cases} 0.02W & W \leq 2.4 \\ 0.0484 & W > 2.4 \end{cases} \quad (24)$$

$$LAI = \frac{LA}{A} \quad (25)$$

Finalmente, $f(N_{up})$ esta dada por

$$f(N_{up}) = \begin{cases} 0 & (N_{up}/w) < 0.02 \\ \frac{100}{3} \left(\frac{N_{up}}{w} - 0.02 \right) & 0.02 \leq \begin{matrix} (N_{up}/w) \leq 0.05 \\ (N_{up}/w) > 0.05 \end{matrix} \end{cases} \quad (26)$$

Los parámetros del modelo acoplado se describen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. parámetros del modelo acoplado, parámetros a los que se realizó calibración marcados por (*)

Parámetros	Modelo ¹	Estimados	Unidades	Descripción
k_{maxa}	0.75	0.5	-	*Coeficiente de máxima asimilación de alimento
k_{PE}	0.45	0.45	(g proteína (kcal food) ⁻¹) ⁻²	*Coeficiente de ratio de energía proteica sobre la asimilación de alimento
k_{alim}	0.31	0.31	-	*Coeficiente de catabolismo alimentario
k_{m2}	0	0	-	*Tasa de mortalidad de peces (experimento)
k_{fast}	0.005	0.005	day ⁻¹ h	*Coeficiente de catabolismo en ayunas
k_{nl}	0.17	0.17	day ⁻¹ h	*Coeficiente de pérdida de nitrógeno al aire
$FAPP_{max}$	0.17	0.17	(kcal food)(fish) ⁻¹ (day) ⁻¹	Máximo apetito de pescado
PE_{opt}	0.09	0.09	(g protein)(kcal) ⁻¹	*Ratio óptimo de energía proteica
PE_{min}	0.025	0.025	g protein)(kcal) ⁻¹	*Ratio mínimo de energía proteica
PE	0.0669	0.0669	g proteína* (kcal) ⁻¹	*Relación proteína-energía para alimento para peces
FB_s	22	19.5	(kcal fish)(fish) ⁻¹	Tamaño promedio de los peces (experimento)
FP	18	16	-	Número de peces inicial (experimento)
F_i	0.908499	3.168	m ³ day ⁻¹	Tasa de flujo del efluente en el sistema
FED	4.2	3.22	Kcal g ⁻¹	densidad de energía en el alimento
b	0.18	0.30	-	Porcentaje de alimentos no consumidos (experimento)
c	0.59	0.59	-	*Parámetro regresivo para describir el efecto de la temperatura del agua en el catabolismo en ayunas

d	0.027	0.027	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	*Parámetro regresivo para describir el efecto de la temperatura del agua en el catabolismo en ayunas
m	-0.35	-0.35	-	*Exponente de la biomasa individual de peces para el consumo de alimentos
n	-0.12	-0.12	-	*Exponente de la biomasa individual de peces para el catabolismo en ayunas
V_{tanq}		0.15	m^3	Volumen del estanque de peces
V_{cp}		0.075	m^3	Volumen en la cama de plantas
PN	60	21		cantidad de plantas en el sistema
p_1	0.16	0.06	-	Porcentaje de nitrógeno en proteína (experimento)
p_2	0.47	0.783	-	Nitrógeno total excretado en los desechos de los peces
p_3	0.82	0.70	-	Cantidad de alimento consumido por los peces
p_4, p_5	0.003 0.0048	0.003 0.0048	-	*Parámetros de aproximación logarítmica no lineal de absorción de nitrógeno por las plantas
p_6	22	29	-	Número de plantas por m^2 (experimento)
p_7	0.3	0.4	m	Nivel del agua (experimento)
$\bar{p}$	0.85	0.85	-	*Exponente de $f(FQ)$
θ	0.68		-	Factor para convertir CO_2 en materia seca
$c_{q10,\mu}$	1.6		-	Factor Q_{10} para el crecimiento
k	0.9		-	Coeficiente de extinción

ξ	14×10^{-4}	$\text{g (CO}_2\text{) J}^{-1}$	Eficiencia en el uso de la luz de las hojas
β	0.34/24	$\text{g (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{ día}^{-1}$	punto de compensación de Co ₂ para tener en cuenta la fotorrespiración
σ	7.2/24	m día^{-1}	Conductancia de la hoja a la difusión de CO ₂
Y_G	0.08	-	Eficiencia de conversión
μ_{max}	0.01/24	día^{-1}	Tasa de crecimiento de saturación a 20°C
C_{CO_2}	0.8	$\text{g (CO}_2\text{) m}^{-3}$	Concentración de CO ₂ en el aire
$J_{max,0}$	0.0374×24	$\text{Mmol día}^{-1} \text{g}^{-1} \text{ DM}$	Valor de J_{max} cuando $w=0$
α	0.151	$\text{g}^{-1} \text{ DM}$	*Coeficiente de J_{max}

Li et al. (2021) ¹ ; *parámetros incluidos en la calibración

Implementación del modelo en MATLAB

Para la implementación del modelo se utilizó la plataforma de MATLAB. Este consta de un programa principal donde se definen los parámetros, variables de entrada y salidas, así como las opciones de simulación. La resolución del modelo dinámico del sistema acuapónico se llevó a cabo mediante el solucionador ode23s de MATLAB. Este método corresponde a un integrador implícito de bajo orden basado en fórmulas de Rosenbrock, diseñado específicamente para la solución de ecuaciones diferenciales rígidas (stiff) con tolerancia de 1×10^{-8} .

Análisis de sensibilidad

Para identificar los parámetros que ejercen mayor influencia sobre las variables dinámicas del modelo acuapónico, se realizó un análisis de sensibilidad global utilizando el enfoque SAFE (Sensitivity Analysis For Everybody). Este método proporciona un conjunto de herramientas estadísticas que permiten cuantificar la contribución individual

y conjunta de los parámetros a la variabilidad de las salidas del modelo, considerando simultáneamente no linealidades e interacciones.

Calibración del modelo

Con el objetivo de estimar los parámetros óptimos del modelo dinámico acuapónico y ajustar su comportamiento a los datos experimentales obtenidos en invernadero, se llevó a cabo un proceso de calibración mediante un Algoritmo Genético (GA). Este enfoque evolutivo permite resolver problemas de optimización no lineales y multimodales, donde las funciones objetivo presentan zonas de alta rugosidad o múltiples mínimos locales, como ocurre en los sistemas biológicos acoplados.

Resultados y discusión

En la Figura 1 se muestran el comportamiento de la temperatura y radiación PAR en el invernadero.

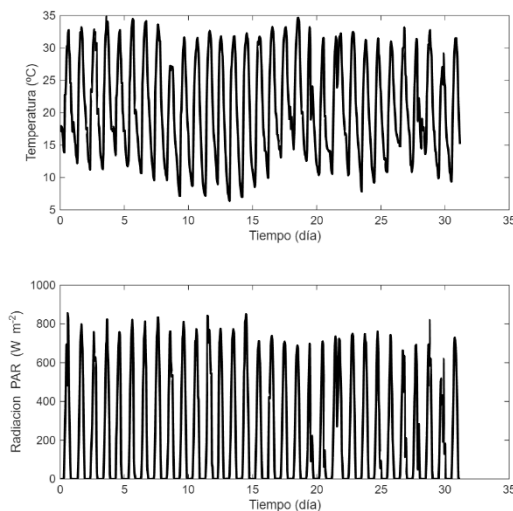


Figura 5. 1 Variables medidas de entrada del modelo, Irad [W m²] (Radiación solar), Ts [°C] (Temperatura interna).

Las mediciones registradas durante los 30 días de monitoreo se mantuvieron dentro de los rangos reportados como normales para sistemas acuapónicos establecidos en invernadero. La temperatura ambiental, que osciló entre 15 y 35 °C, se encuentra dentro del intervalo típico señalado para invernaderos de clima templado, donde pueden presentarse variaciones amplias debido a la radiación solar y la inercia térmica de la

estructura (Montero et al., 2011; Castilla, 2013). Además, estas temperaturas son compatibles con el rango de tolerancia de especies comúnmente empleadas en acuaponía, como la tilapia, que puede soportar temperaturas entre 14 y 36 °C sin comprometer severamente su supervivencia (El-Sayed, 2006).

En cuanto a la radiación fotosintéticamente activa (PAR), los valores registrados entre 0 y 800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ corresponden a condiciones habituales dentro de invernaderos con cubierta plástica, donde la radiación incidente se atenúa entre un 30 y 60 % respecto al exterior (Both et al., 2015). Para cultivos hortícolas como la lechuga, estos niveles de PAR se consideran adecuados para mantener un crecimiento óptimo sin inducir fotoinhibición (Resh, 2013). Estos datos fueron utilizados en el modelo acoplado.

Con el fin de determinar los parámetros más influyentes del modelo, se implementó el análisis de sensibilidad descrito en la metodología, los resultados se muestran en la Figura 2 en donde **Jmax** y α fueron los parámetros más influyentes, lo cual indica que pequeñas variaciones en sus valores pueden generar cambios importantes en la simulación del crecimiento vegetal y del uso del nitrógeno. En modelos de cultivos, parámetros asociados a la capacidad máxima de absorción de nutrientes (**Jmax**) y a la eficiencia de conversión del nitrógeno (α) suelen ser altamente determinantes para explicar la dinámica del crecimiento, por lo que requieren especial atención (Zhang *et al.*, 2008; Marcelis & Heuvelink, 2007). Por ello, debido a la alta sensibilidad de **Jmax** y α , se llevó a cabo la calibración de los parámetros marcados con (*) en el cuadro 2 mediante un Algoritmo Genético, con el fin de optimizar el ajuste del modelo a los datos experimentales y mejorar su capacidad predictiva.

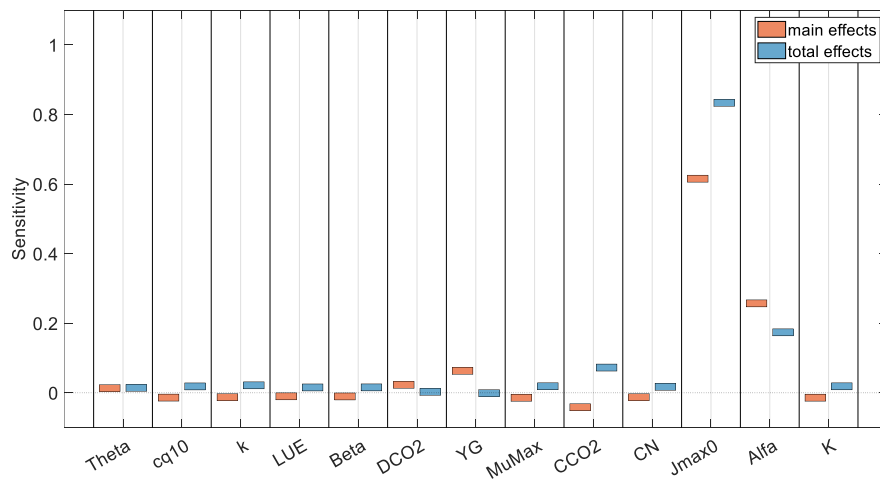


Figura 5. 2 Índices de sensibilidad para el cultivo.

Los resultados de la calibración indican que el modelo presentó un comportamiento adecuado frente a los datos experimentales. Después del ajuste de los parámetros seleccionados, las simulaciones lograron reproducir de manera consistente las tendencias observadas en el sistema acuapónico, tanto en la dinámica del nitrógeno como en el crecimiento de las plantas. La reducción en el error entre los valores simulados y medidos confirma que el proceso de calibración fue efectivo, permitiendo que el modelo capturara con mayor precisión los procesos biológicos y fisicoquímicos del sistema. En conjunto, estos resultados muestran que el modelo calibrado es capaz de representar satisfactoriamente el comportamiento real del nitrógeno acumulado y puede utilizarse con confianza en análisis y escenarios posteriores

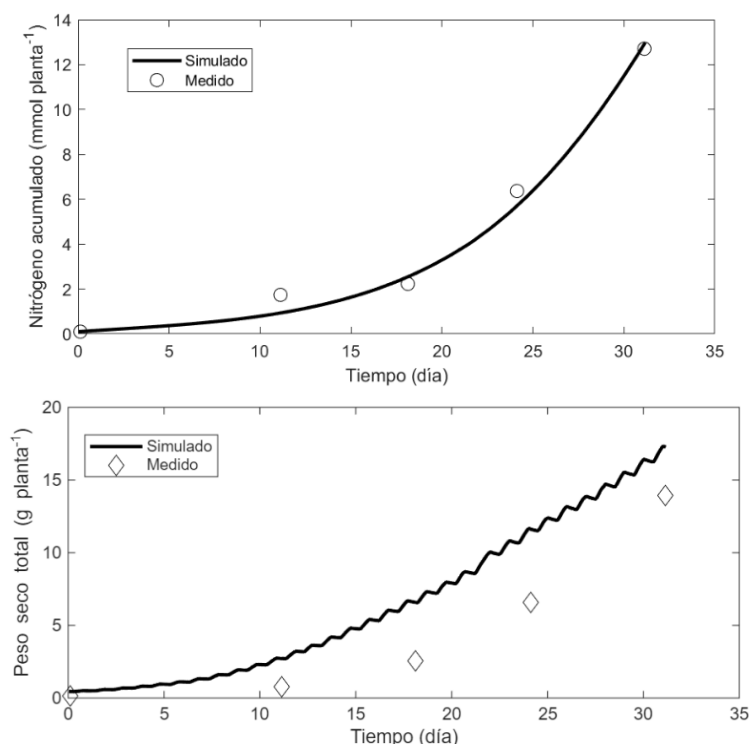


Figura 5. 3 Nitrógeno acumulado y peso seco total después de la calibración del modelo

Posterior mente se llevó a cabo el análisis de sensibilidad global del modelo acoplado de Li *et al.* (2021) y Zhang *et al.* (2008), de los 44 parámetros se analizaron 14 parámetros que son los más influyentes en el sistema, este análisis mostró que los parámetros FAPPmax, Kmaxa y PE, relacionados con la excreción y retención de nitrógeno por los peces, ejercen la mayor influencia sobre la concentración de nitrógeno disponible en el sistema (Figura 4). Esto coincide con lo reportado en estudios donde el metabolismo del pez es identificado como el principal regulador del aporte nitrogenado en sistemas acuapónicos (Montanhini Neto & Ostrensky, 2015; Zou *et al.*, 2016).

De forma complementaria, en el modelo de Zhang *et al.* (2008) los parámetros más sensibles, como α y Jmax, están asociados a la eficiencia de absorción de nitrógeno por la planta, confirmando que la disponibilidad de nitrógeno afecta directamente la acumulación de biomasa, tal como también señalan Delaide *et al.* (2016).

La integración de ambos resultados evidencia que la sensibilidad del sistema está distribuida entre: La oferta de nitrógeno, controlada por los parámetros sensibles del

modelo de Li *et al.* (2021), y la demanda de nitrógeno, regulada por los parámetros sensibles del modelo de Zhang *et al.* (2008).

Esto confirma que, en sistemas acuapónicos acoplados, la dinámica del nitrógeno depende simultáneamente del metabolismo de peces y plantas, justificando la necesidad de calibrar los parámetros críticos de ambos submodelos para mejorar la precisión del modelo acoplado (Pianosi *et al.*, 2016; Wallach *et al.*, 2014).

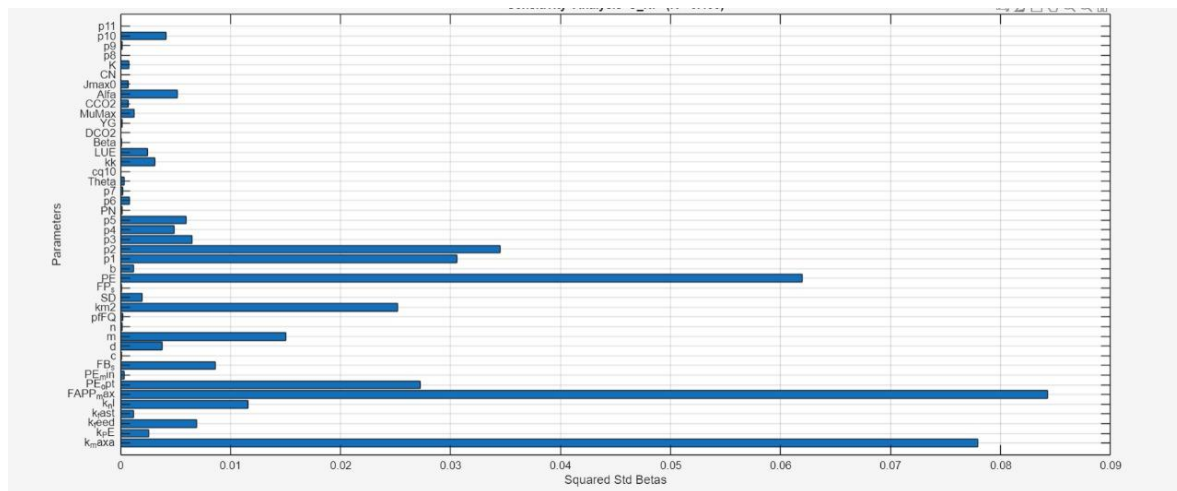


Figura 5. 4 Índices de sensibilidad para el cultivo

Calibración del modelo acoplado para el segundo ciclo de producción

En la Figura 13 se muestra la calibración del modelo acoplado empleando los parámetros más influyentes. Se observa que las variables relacionadas con el crecimiento y la alimentación de los peces se ajustan satisfactoriamente al modelo; no obstante, las concentraciones de nitrógeno tanto en la cama de plantas como en los estanques de peces aún presentan desviaciones que requieren un ajuste adicional. Este hallazgo resalta la necesidad de continuar con la investigación y la calibración del modelo, con el objetivo de mejorar su capacidad predictiva y su aplicabilidad para optimizar el manejo del sistema acuapónico, especialmente en lo que respecta a la dinámica de nutrientes y

la eficiencia en el uso del nitrógeno.

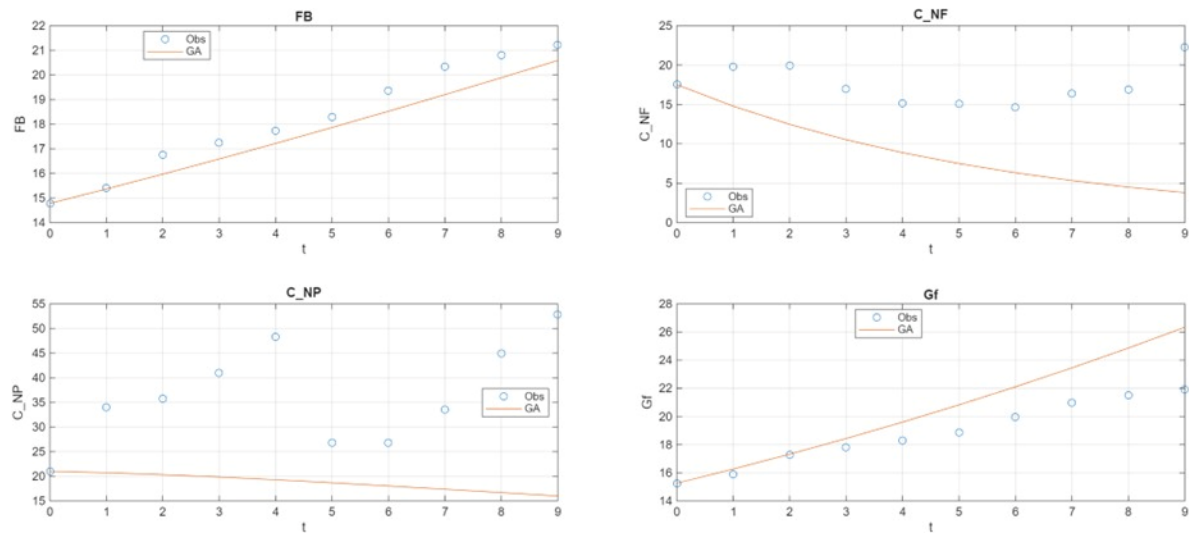


Figura 5. 5 calibración del modelo acoplado.

CONCLUSIÓN

Los parámetros utilizados para la calibración del modelo indicaron que son los más influyentes en el flujo de nitrógeno en plantas y peces. Aunque los resultados mostraron un buen ajuste en el crecimiento y alimentación de los peces, las concentraciones de nitrógeno en la cama de plantas y en los estanques aún requieren refinamiento. Los datos de temperatura ($15\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$) y radiación PAR ($0\text{--}800\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) se mantuvieron dentro de rangos normales para invernaderos con acuaponía, asegurando condiciones adecuadas para la lechuga y la tilapia. Por lo tanto, los datos de condiciones ambientales fueron adecuadas para el desarrollo de la lechuga y la tilapia, y respaldando la validez para calibrar el modelo, el análisis de sensibilidad global mediante el método SAFE permitieron identificar los parámetros más influyentes, demostrando la utilidad del modelo para comprender y optimizar la dinámica de nutrientes en el sistema.

Aunque el modelo presenta un desempeño satisfactorio, su precisión podría mejorarse aplicando otros métodos de optimización y calibración, como algoritmos evolutivos, Isqnonlin, Levenberg-Marquardt, Monte Carlo y análisis de sensibilidad adicionales, con el objetivo de perfeccionar el ajuste del modelo y maximizar la eficiencia en el uso de nutrientes y la productividad de los sistemas acuapónicos.

Literatura citada

- Aleksić, N., & Šušteršič, V. (2020). Analysis of application of aquaponic system as a model of the circular economy: A review. *Recycling and Sustainable Development*, 13(1), 73–86. <https://doi.org/10.5937/ror2001073A>
- Both, A. J., van Henten, E. J., & Hemming, S. (2015). Guidelines for measuring and reporting environmental parameters in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 1072, 89–96. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1072.12>
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179(3), 339–352. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500565>
- El-Sayed, A.-F. M. (2006). *Tilapia culture*. CABI.
- Guzmán Duchén, D., & Montero Torres, J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 87–101. <https://doi.org/10.53287/uyxf4027gf99e>
- Heuvelink, E. (2018). *Growth models for greenhouse crops: From concept to application*. Wageningen Academic Publishers.
- Körner, O., Challa, H., & van Straten, G. (2007). Optimization of greenhouse tomato production by using an energy balance model. *Acta Horticulturae*, 801, 825–834. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.801.101>
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The basics. In S. Goddek et al. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 113–143). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5
- Li, K., Liang, W., Huang, H., Dang, Z., & Liu, C. (2021). Mechanistic modeling and evaluation of an integrated aquaponic system with tilapia and Chinese cabbage. *Agricultural Systems*, 191, 103143. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103143>
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Ma, X., Hu, X., Wu, L., Zhao, K., & Li, Z. (2020). A differential evolution algorithm for parameter optimization in ecosystem and crop models. *Environmental Modelling & Software*, 124, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104609>
- Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., & Goudriaan, J. (1998). Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae*, 74(1–2), 83–111. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00083-1)

- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Montero, J. I., Manuel, R., & Sánchez, C. (2011). Greenhouse climate: Basic concepts and management strategies. *Biosystems Engineering*, 108(3), 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.10.005>
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J., Rougier, J., Stephenson, D., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7th ed.). CRC Press.
- Seginer, I., Sher, Y., & van Straten, G. (1998). Optimal temperature control of a greenhouse lettuce crop. *Agricultural Systems*, 56(2), 171–196. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(97\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(97)00053-7)
- Sweeney, J. W., Graebe, M. S., & Jacobs, S. B. (1981). A growth model for lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106(1), 64–69.
- Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6–13. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6>
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2014). *Working with dynamic crop models: Methods, tools, and examples for agriculture and environment*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19194-7>
- Yang, T., & Kim, H. J. (2019). Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency in aquaponic systems. *Scientia Horticulturae*, 256, 108619. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>
- Zhang, X., Heuvelink, E., Carvalho, S. M., & Marcelis, L. F. M. (2008). A dynamic model of nitrogen uptake and dry matter production in lettuce. *Scientia Horticulturae*, 115(1), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.07.012>
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Liang, S., Wang, J., & Yan, R. (2016). Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifiers addition and filler gradation. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 6671–6679. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5906-x>

6. CONCLUSIÓN GENERAL

Este estudio permitió evaluar comparativamente el rendimiento y la eficiencia en el uso del nitrógeno en dos sistemas acuapónicos destinados a la producción de lechuga y tilapia, cumpliendo así el objetivo planteado y aportando información valiosa para la optimización de estos sistemas. El registro del crecimiento de plantas y peces, junto con el monitoreo continuo de parámetros como pH, amonio y contenido de nitrógeno en el efluente, permitió caracterizar el comportamiento de cada tratamiento y su capacidad para transformar y aprovechar el nitrógeno disponible.

Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre los sistemas evaluados, destacándose aquel que integró un sustrato de tezontle, el cual mostró un mejor aprovechamiento del nitrógeno y un mayor desempeño productivo. Asimismo, se observó que la acumulación de materia seca en las plantas incrementó de manera notable a partir de la segunda etapa de crecimiento, lo que refleja una demanda creciente de nutrientes conforme avanza el desarrollo del cultivo.

De los datos obtenidos experimentalmente, se desarrolló y calibró un modelo dinámico de balance de nitrógeno con el propósito de identificar los parámetros más influyentes y mejorar su capacidad predictiva. El análisis de sensibilidad global, realizado mediante el método SAFE, permitió determinar los factores que generan mayor variabilidad en el sistema y contribuyó a fortalecer la robustez del modelo. De acuerdo con los indicadores de ajuste, el modelo calibrado reproduce adecuadamente la dinámica del contenido de nitrógeno y la acumulación de materia seca en las plantas, consolidándose como una herramienta útil para la interpretación del sistema y la mejora en la toma de decisiones.

En conjunto, estos resultados destacan la importancia de combinar experimentación y modelación dinámica para comprender y optimizar la eficiencia de los sistemas acuapónicos. Además, subrayan el potencial del sustrato de tezontle como una alternativa que favorece el uso eficiente de nutrientes y contribuye al desarrollo de sistemas productivos más sostenibles y resilientes.