e-ISSN: 2007-4034 / ISSN print: 1027-152X

Scientific article https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2025.10.014

Comparison of lettuce yield in conventional aquaponics and biofloc systems

Comparación del rendimiento de lechuga en sistemas de acuaponía convencional y *biofloc*

Claudia Lorena Cerón-Argüelles; Raquel Salazar-Moreno; Joel Pineda-Pineda*; Luis Fernando Contreras-Cruz

Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

*Corresponding author: pinedapjoel@yahoo.com.mx

Abstract

Aquaponics is an integrated production system that combines fish and plant farming. This study aimed to compare the yield of lettuce grown in a biofloc-based system (T1-Bio) and in a conventional aquaponics system with simple recirculation (T2-Rec). In both treatments, water quality parameters, fresh and dry weight of lettuce, as well as nutrient concentration in the leaf tissue and nutrient solution, were evaluated. Under T2-Rec, an average fresh weight of 321.31 g·plant^{-1} and a yield of 10.93 kg·m^{-2} were recorded, with a tilapia stocking density of 4 kg·m^{-3}. In contrast, with T1-Bio, 10.73 g·plant^{-1} and 0.375 kg·m^{-2} were obtained, respectively, with a density of 3 kg·m^{-3}. Likewise, T2-Rec showed higher foliar concentrations of N, P, K, and Ca, as well as the highest values of Fe (253.11 mg·kg^{-1}) and Mn (103.40 mg·kg^{-1}). In the nutrient solution, T1-Bio showed higher concentrations of N (13.53 mg·L^{-1}), P (13.43 mg·L^{-1}), Ca (46 mg·L^{-1}), and Fe (0.53 mg·L^{-1}), while T2-Rec registered higher concentrations of K (138.67 mg·L^{-1}), Mg (172.50 mg·L^{-1}), Mn (0.33 mg·L^{-1}), and B (0.23 mg·L^{-1}). The results indicate that the T2-Rec system was significantly more efficient than the T1-Bio system, both in lettuce yield and in the accumulation of essential nutrients in the plant tissue.

Keywords: *Lactuca sativa*, nitrification, mineralization, biomass, recirculation.

Resumen

La acuaponía es un sistema de producción integrado que combina el cultivo de peces y plantas. El objetivo del presente estudio fue comparar el rendimiento de lechuga cultivada en un sistema basado en tecnología *biofloc* (T1-Bio) y en un sistema de acuaponía convencional con recirculación simple (T2-Rec). En ambos tratamientos se evaluaron parámetros de calidad del agua, peso fresco y seco de lechuga, así como la concentración de nutrimentos en el tejido foliar y en la solución nutritiva. Bajo el T2-Rec se registró un peso fresco promedio de 321.31 g·planta^{-1} y un rendimiento de 10.93 kg·m^{-2}, con una densidad de cultivo de tilapia de 4 kg·m^{-3}. En contraste, con el T1-Bio se obtuvieron 10.73 g·planta^{-1} y 0.375 kg·m^{-2}, respectivamente, con una densidad de 3 kg·m^{-3}. Asimismo, el T2-Rec presentó mayores concentraciones foliares de N, P, K y Ca, así como los valores más altos de Fe (253.11 mg·kg^{-1}) y Mn (103.40 mg·kg^{-1}). En la solución nutritiva, T1-Bio mostró concentraciones superiores de N (13.53 mg·L^{-1}), P (13.43 mg·L^{-1}), Ca (46 mg·L^{-1}) y Fe (0.53 mg·L^{-1}), mientras que T2-Rec registró concentraciones mayores de K (138.67 mg·L^{-1}), Mg (172.50 mg·L^{-1}), Mn (0.33 mg·L^{-1}) y B (0.23 mg·L^{-1}). Los resultados indican que el sistema T2-Rec fue significativamente más eficiente que el T1-Bio, tanto en el rendimiento de lechuga como en la acumulación de nutrientes esenciales en el tejido vegetal.

Palabras clave: *Lactuca sativa*, nitrificación, mineralización, biomasa, recirculación.

Please cite this article as follows (APA 7): Cerón-Argüelles, C. L., Salazar-Moreno, R., Pineda-Pineda, J., & Contreras-Cruz, L. F. (2026). Comparison of lettuce yield in conventional aquaponics and biofloc systems. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, *32*, e25014. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2025.10.014

Revista Chapingo Serie Horticultura

Received: September 18, 2025 | **Accepted:** April 16, 2026 | **Published online:** November 10, 2026.

https://revistas.chapingo.mx/horticultura/

Introduction

Climate change has intensified water scarcity in Mexico, and projections for 2030 indicate significant reductions in agricultural productivity and available arable land (Estrada et al., 2022). At the same time, population growth has driven the expansion of intensive agriculture and aquaculture systems, placing the food sector among the fastest-growing productive activities in the last decade, with an annual rate close to 5.4 % (Monsees et al., 2019). Given this scenario, controlled and sustainable production systems are consolidating as strategic alternatives to guarantee food with adequate quality parameters (Velasco-Muñoz et al., 2018).

Aquaponics is an integrated system of aquaculture and hydroponics, in which wastewater generated by fish nourishes the plants (Nishanth et al., 2025). In turn, the plants act as biofilters that maintain water quality for aquatic organisms (Pineda-Pineda et al., 2018). The stability of this system depends on the balance between variables such as temperature, pH, electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), and the concentration of nitrogen compounds (NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-) (Wongkiew et al., 2018). Among these factors, the accumulation of ammonium (NH_4^+), a product of metabolism and uneaten food, represents one of the main limitations for the development of the system, since its conversion to NO_2^- and NO_3^- requires the participation of nitrifying bacteria of the genera *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, and *Nitrospira* (Modarelli et al., 2022).

In this context, Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) stands out as the most produced species in Mexican aquaculture due to its rapid growth and tolerance to environmental variations (Urías-Sotomayor et al., 2022). Its production has been optimized through the biofloc system, which improves feed efficiency and water quality by promoting the development of microbial biomass by adjusting the C:N ratio (Betanzo-Torres et al., 2019). On the other hand, lettuce (*Lactuca sativa*) is one of the most consumed vegetables in Mexico and is the most cultivated species in aquaponics due to its short production cycle and high yield in controlled environments (Saavedra-Rincón et al., 2017).

Considering the above, the objective of this study was to compare the yield of lettuce grown in a system based on biofloc technology and in a conventional aquaponic system, using tilapia as the aquaculture species. The physicochemical properties of the nutrient solution and the nutrient content of the leaf tissue were also evaluated.

Introducción

El cambio climático ha intensificado la escasez hídrica en México, y las proyecciones para 2030 indican reducciones importantes en la productividad agrícola y en la superficie cultivable disponible (Estrada et al., 2022). Al mismo tiempo, el crecimiento demográfico ha impulsado la expansión de los sistemas intensivos de agricultura y acuicultura, lo que posiciona al sector alimentario entre las actividades productivas de mayor crecimiento en la última década, con una tasa anual cercana al 5.4 % (Monsees et al., 2019). Ante este escenario, los sistemas de producción controlada y sustentable se consolidan como alternativas estratégicas para garantizar alimentos con parámetros de calidad adecuados (Velasco-Muñoz et al., 2018).

La acuaponía es un sistema integrado de acuicultura e hidroponía, en el que el agua residual generada por los peces nutre a las plantas (Nishanth et al., 2025). A su vez, las plantas actúan como biofiltros que mantienen la calidad del agua para los organismos acuáticos (Pineda-Pineda et al., 2018). La estabilidad de este sistema depende del equilibrio entre variables como la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica (CE), el oxígeno disuelto (OD) y la concentración de compuestos nitrogenados (NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-) (Wongkiew et al., 2018). Entre estos factores, la acumulación de amonio (NH_4^+), producto del metabolismo y del alimento no consumido, representa una de las principales limitantes para el desarrollo del sistema, ya que su conversión a NO_2^- y NO_3^- requiere la participación de bacterias nitrificantes de los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* y *Nitrospira* (Modarelli et al., 2022).

En este contexto, la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) destaca como la especie más producida en la acuicultura mexicana debido a su rápido crecimiento y tolerancia a variaciones ambientales (Urías-Sotomayor et al., 2022). Su producción se ha optimizado mediante el sistema *biofloc*, el cual mejora la eficiencia alimenticia y la calidad del agua al fomentar el desarrollo de biomasa microbiana mediante el ajuste de la relación C:N (Betanzo-Torres et al., 2019). Por otro lado, la lechuga (*Lactuca sativa*) es una de las hortalizas de mayor consumo en México y es la especie más cultivada en acuaponía por su corto ciclo de producción y su elevado rendimiento en ambientes controlados (Saavedra-Rincón et al., 2017).

Considerando lo anterior, el objetivo del presente estudio fue comparar el rendimiento de lechuga cultivada en un sistema basado en tecnología *biofloc* y en un sistema acuapónico convencional, utilizando tilapia como especie acuícola. Asimismo, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de la solución nutritiva y el contenido nutrimental del tejido foliar.

Materials and methods

Experimental site

The study was conducted in a 195 m^2 greenhouse located in the San Ignacio experimental field of the *Universidad Autónoma Chapingo*, Texcoco, State of Mexico (19° 29' 12'' N and 98° 53' 21'' W, at 2 240 m a. s. l.).

Treatments, experimental design and crop management

Two aquaponic systems were evaluated under a completely randomized design with three replicates. The first treatment corresponded to an aquaponic system based on biofloc technology (T1-Bio) and the second consisted of a conventional aquaponic system with simple recirculation (T2-Rec).

In T1-Bio, circular polyethylene tanks 60 cm in diameter and 170 L in capacity (operated with 150 L of water) were used. Each tank contained a 70 L radial flow settler for solids removal, connected to a 40 L tub with 6 m of nylon mesh used as a substrate for microbial growth, and to another 210 L tub (1×0.6×0.4 m) with a 1" polystyrene floating raft. This treatment was operated with a C:N ratio of 12:1, with molasses as the carbon source and 5 % of the feed ration (formula 5015).

In T2-Rec, the physical arrangement described by Pineda-Pineda et al. (2018) was used, which consisted of a culture bed with *tezontle* arranged in three granulometric layers: 8 mm (bottom), 6 mm (middle), and 4 mm (top). In this case, the feed consisted of 10 % biomass with the same commercial formula (5015).

Lactuca sativa var. Sangria was sown in germination trays for 14 days. Transplanting was carried out 15 days after sowing, and harvesting took place 21 days after transplanting. In both treatments, the density was 21 plants per 0.6 m^2.

Growth and performance variables

Morphological and productive variables of the plants were evaluated, including the number of leaves, as well as leaf length and width (cm) measured with a measuring tape. Leaf area (cm^2) was estimated using a leaf area integrator (LI-3100, LI-COR®, USA), and the leaf area index (LAI) was calculated according to the methodology described by Lu et al. (2022):

$$LAI = \frac{Leaf\ area\ m^2 \times Population\ density}{Area\ sown\ in\ m^2}$$

The fresh weight (g) of the samples was determined using a digital scale with an accuracy of 0.01 g.

Materiales y métodos

Sitio experimental

El estudio se desarrolló en un invernadero de 195 m^2 ubicado en el campo experimental San Ignacio de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (19° 29' 12'' N y 98° 53' 21'' O, a 2 240 m s. n. m.).

Tratamientos, diseño experimental y manejo del cultivo

Se evaluaron dos sistemas acuapónicos bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones. El primer tratamiento correspondió a un sistema acuapónico basado en tecnología *biofloc* (T1-Bio) y el segundo consistió en un sistema acuapónico convencional con recirculación simple (T2-Rec).

En el T1-Bio se usaron tanques circulares de polietileno de 60 cm de diámetro y 170 L de capacidad (operados con 150 L de agua). Cada tanque contenía un sedimentador de flujo radial de 70 L para la remoción de sólidos, conectado a una tina de 40 L con 6 m de malla de nylon utilizada como sustrato para el desarrollo microbiano y a otra tina de 210 L (1×0.6×0.4 m) con una balsa flotante de poliestireno de 1". Este tratamiento se operó con una relación C:N de 12:1, con melaza como fuente de carbono, y 5 % de ración alimenticia (fórmula 5015).

En el T2-Rec se utilizó el arreglo físico descrito por Pineda-Pineda et al. (2018), el cual consistió en una cama de cultivo con tezontle dispuesto en tres estratos granulométricos: 8 mm (fondo), 6 mm (medio) y 4 mm (superior). En este caso, la alimentación consistió en 10 % de la biomasa con la misma fórmula comercial (5015).

Se sembró *Lactuca sativa* var. Sangria en charolas de germinación durante 14 días. El trasplante se realizó a los 15 días después de la siembra y la cosecha se efectuó 21 días después del trasplante. En ambos tratamientos, la densidad fue de 21 plantas en 0.6 m^2.

Variables de crecimiento y rendimiento

Se evaluaron variables morfológicas y productivas de las plantas, incluyendo el número de hojas, así como el largo y el ancho foliar (cm) medidos con una cinta métrica. El área foliar (cm^2) se estimó con integrador de área foliar (LI-3100, LI-COR®, EUA) y el índice de área foliar (IAF) se calculó de acuerdo con la metodología descrita por Lu et al. (2022):

$$IAF = \frac{Área\ foliar\ en\ m^2 \times Densidad\ de\ población}{Área\ sembrada\ en\ m^2}$$

El peso fresco (g) de las muestras se determinó con una balanza digital con precisión de 0.01 g. Posteriormente,

Subsequently, the samples were dried in a drying oven (ED400, Binder®, Germany) at 65 °C for 48 h to obtain the dry weight (g). Both variables were determined weekly.

The yield (R, $kg \cdot m^{-2}$) was calculated from the equation proposed by Moreno-Simón and Zafra-Trelles (2015) 21 days after transplanting:

$$R = W \times D$$

where W is the average fresh weight per plant ($kg \cdot plant^{-1}$), and D is the density ($plants \cdot m^{-2}$).

Determination of nutrients in plant tissue and nutrient solution

The dried plant samples were ground and subjected to digestion for nutrient determination. The N content was quantified by the micro-Kjeldahl method, and the P ($H_2PO_4^-$) was determined by the yellow molybdovanadate colorimetric method at 420 nm in a UV-Visible spectrophotometer (Genesys 10 UV, Thermo Fisher Scientific®, USA) (Pineda-Pineda et al., 2018). K^+ and Ca^{2+} concentrations were quantified using a flamemeter (PFP7, Jenway®, Bibby Scientific Ltd., UK). BO_3^{3-} was quantified by colorimetry with Azomethine-H using a UV-Visible spectrophotometer (Genesys 10 UV, Thermo Fisher Scientific®, USA). The concentrations of Mg^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+} and Zn^{2+} were determined using an atomic absorption spectrophotometer (Pye Unicam SP9®, Phillips, United Kingdom).

Water quality monitoring

Water temperature, pH, and EC were monitored using GroLine® sensors (HI981420, Hanna Instruments®, Romania), with an accuracy of ±0.05 pH units and ±0.01 $mS \cdot cm^{-1}$ for EC. DO was measured using an oximeter (HI9147, Hanna Instruments®, Romania). The concentrations of ammonium (NH_4^+), nitrites (NO_2^-) and nitrates (NO_3^-) were determined weekly using colorimetric kits (Hagen Nutrafin®).

Statistical analysis

The data were subjected to analysis of variance and Tukey's mean comparison ($\alpha = 0.05$). All statistical analyses were performed using the SAS statistical software (SAS Institute Inc., 2023).

Results and discussion

The coefficients of variation (CV) obtained remained within acceptable ranges for experimental trials (Kozak et al., 2013). For the morphological variables of growth and yield, the CVs ranged from 4.46 to 15.34 %

las muestras se secaron en una estufa de secado (ED400, Binder®, Alemania) a 65 °C por 48 h para obtener el peso seco (g). Ambas variables se determinaron semanalmente.

El rendimiento (R, $kg \cdot m^{-2}$) se calculó a partir de la ecuación propuesta por Moreno-Simón y Zafra-Trelles (2015) a los 21 días después del trasplante:

$$R = P \times D$$

donde P es el peso fresco promedio por planta ($kg \cdot planta^{-1}$) y D es la densidad ($plantas \cdot m^{-2}$).

Determinación de nutrimentos en tejido vegetal y solución nutritiva

Las muestras vegetales secas se molieron y se sometieron a digestión para la determinación nutrimental. El contenido de N se cuantificó por el método micro-Kjeldahl y el P ($H_2PO_4^-$) se determinó mediante el método colorimétrico de molibdovanadato amarillo a 420 nm en un espectrofotómetro UV-Visible (Genesys 10 UV, Thermo Fisher Scientific®, EUA) (Pineda-Pineda et al., 2018). Las concentraciones de K^+ y Ca^{2+} se cuantificaron con un flamómetro (PFP7, Jenway®, Bibby Scientific Ltd., Reino Unido). El BO_3^{3-} se cuantificó por colorimetría con Azometina-H en espectrofotómetro UV-Visible (Genesys 10 UV, Thermo Fisher Scientific®, EUA). Las concentraciones de Mg^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+} y Zn^{2+} se determinaron con un espectrofotómetro de absorción atómica (Pye Unicam SP9®, Phillips, Reino Unido).

Monitoreo de la calidad del agua

La temperatura, el pH y la CE del agua se monitorearon con sensores GroLine® (HI981420, Hanna Instruments®, Rumania), con precisión de ±0.05 unidades de pH y ±0.01 $mS \cdot cm^{-1}$ de CE. El OD se midió con un oxímetro (HI9147, Hanna Instruments®, Rumania). Las concentraciones de amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) se determinaron semanalmente con kits colorimétricos (Hagen Nutrafin®).

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Todos los análisis estadísticos se efectuaron en el programa estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2023).

Resultados y discusión

Los coeficientes de variación (CV) obtenidos se mantuvieron dentro de rangos aceptables para ensayos experimentales (Kozak et al., 2013). En las variables morfológicas de crecimiento y rendimiento, los CV

(Table 1), indicating low variability among replicates and adequate control of experimental conditions. In particular, the leaf length and width variables showed CV values below 5 %.

In the evaluation of nutrients in plant tissue and nutrient solution, the CVs also remained at adequate levels (Kozak et al., 2013). However, some variables associated with nitrogen compounds and micronutrients showed relatively high values, possibly due to biogeochemical processes such as microbial mineralization, ionic competition, or heterogeneity in bacterial floc formation. Despite this variability, significant differences ($p \leq 0.05$) were detected in most of the variables evaluated, confirming the robustness of the experimental design.

Growth and performance variables

Significant differences ($p < 0.05$) were observed between treatments in all morphological and productive variables evaluated (Table 1; Figure 1). The higher values obtained with T2-Rec were associated with more favorable conditions for nutrient absorption, derived from the use of *tezontle* as a support medium, since granulometry, porosity, particle size, pH, and EC influence root development and nutrient availability (Trejo-Téllez et al., 2013). Valenzuela-Antelo et al. (2023) indicate that the use of *tezontle* with particles <1 cm favors moisture retention and provides a larger surface area for the establishment of bacteria in aquaponics, which supports the efficiency of the material used in the T2-Rec.

The average fresh weight recorded in T2-Rec was 312.31 g·plant^{-1}, while the dry weight reached

En la evaluación de nutrimentos en el tejido vegetal y en la solución nutritiva, los CV también se mantuvieron en niveles adecuados (Kozak et al., 2013). No obstante, algunas variables asociadas a compuestos nitrogenados y micronutrientes presentaron valores relativamente elevados, posiblemente debido a procesos biogeoquímicos como la mineralización microbiana, la competencia iónica o la heterogeneidad en la formación de flóculos bacterianos. A pesar de esta variabilidad, se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la mayoría de las variables evaluadas, lo que confirma la robustez del diseño experimental.

Variables de crecimiento y rendimiento

Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos en todas las variables morfológicas y productivas evaluadas (Cuadro 1; Figura 1). Los mayores valores obtenidos con el T2-Rec se asociaron a condiciones más favorables para la absorción de nutrientes, derivadas del uso de tezontle como medio de soporte, ya que la granulometría, la porosidad, el tamaño de partícula, el pH y la CE influyen en el desarrollo radicular y en la disponibilidad nutrimental (Trejo-Téllez et al., 2013). Valenzuela-Antelo et al. (2023) señalan que el uso de tezontle con partículas <1 cm favorece la retención de humedad y proporciona una mayor superficie para el establecimiento de bacterias en acuaponía, lo que respalda la eficiencia del material empleado en el T2-Rec.

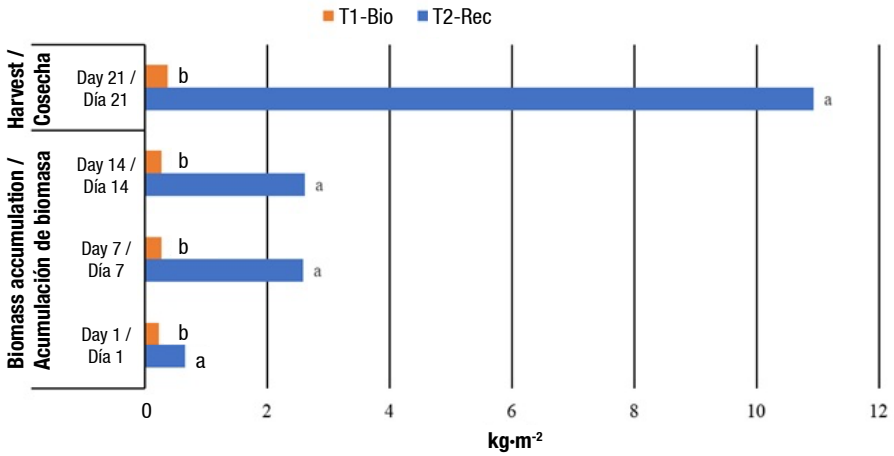
Table 1. Comparison of means of the morphological variables of lettuce (*Lactuca sativa* var. Sangria) evaluated 21 days after transplanting.

Cuadro 1. Comparación de medias de las variables morfológicas de lechuga (*Lactuca sativa* var. Sangria) evaluadas 21 días después del trasplante.

Treatments / Tratamientos	Number of leaves / Número hojas	Length (cm) / Largo (cm)	Width (cm) / Ancho (cm)	Leaf area (cm^2) / Área foliar (cm^2)	LAI / IAF	Fresh weight (g) / Peso fresco (g)	Dry weight (g) / Peso seco (g)
T1-Bio	9.33 b	6.95 b	5.09 b	161.54 b	2.24 b	10.73 b	5.36 b
T2-Rec	28.0 a	17.79 a	14.44 a	4 627.4 a	64.26 a	312.31 a	61.17 a
CV (%)	10.93	4.71	4.46	13.63	13.63	12.33	15.34
HSD / DMSH	4.62	1.32	0.98	740.14	10.28	45.15	11.57

LAI: leaf area index; T1-Bio: aquaponics system based on biofloc technology; T2-Rec: conventional aquaponics system with simple recirculation; CV: coefficient of variation; HSD: honestly significant difference. Different letters in each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

IAF: índice de área foliar; T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple; CV: coeficiente de variación; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).



	Day 1 / Día 1	Day 7 / Día 7	Day 14 / Día 14	Day 21 / Día 21
CV (%)	10.66	23.82	20.98	12.33
HSD / DMSH	180.05	1290.4	1149.1	2634

Figure 1. Comparison of means of the average yields of lettuce (*Lactuca sativa* var. Sangria) 21 days after transplanting. T1-Bio: aquaponics system based on biofloc technology; T2-Rec: conventional aquaponics system with simple recirculation; CV: coefficient of variation; HSD: honestly significant difference. Bars with different letters for each sampling date indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figura 1. Comparación de medias del rendimiento promedio de lechuga (*Lactuca sativa* var. Sangria) 21 días después del trasplante. T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple; CV: coeficiente de variación; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Barras con letras distintas en cada fecha de muestreo indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

61.17 g·plant^{-1}, values 29.1 and 11.41 times higher than those obtained with T1-Bio (Table 1). These results are comparable to those reported by Monsees et al. (2019) in a decoupled recirculating aquaculture system (RAS-D), who obtained between 323.3 and 332 g·plant^{-1}. These authors mention that decoupled aquaponics can match hydroponics with 63 % less mineral fertilizer.

The T2-Rec presented the highest LAI (64.26), which indicates a greater capacity to intercept photosynthetically active radiation and, consequently, a greater production and distribution of photoassimilates via phloem to the growth organs (Barrientos-Llanos et al., 2015). The larger leaf surface area observed in this treatment favored the synthesis and translocation of photosynthates, reflected in a greater accumulation of biomass and in higher values of fresh and dry weight (Taiz et al., 2023). The LAI obtained agrees with that reported by García-Zertuche et al. (2021) in an aquaponic system without supplemental fertilization. Zhang et al. (2025) reported that low or moderate growing densities increase the effective leaf area for intercepting radiation before shading, which favors photosynthetic efficiency and plant growth, as occurred in the present work.

Although light intensity was constant, photosynthetic efficiency differed between treatments. T1-Bio reached

El peso fresco promedio registrado en el T2-Rec fue de 312.31 g·planta^{-1}, mientras que el peso seco alcanzó 61.17 g·planta^{-1}, valores 29.1 y 11.41 veces superiores a los obtenidos con T1-Bio (Cuadro 1). Estos resultados son comparables con los reportados por Monsees et al. (2019) en un sistema de acuicultura con recirculación desacoplado (RAS-D, por sus siglas en inglés), quienes obtuvieron entre 323.3 y 332 g·planta^{-1}. Estos autores mencionan que la acuaponía desacoplada puede igualar a la hidroponía con un 63 % menos de fertilizante mineral.

El T2-Rec presentó el mayor IAF (64.26), lo cual indica una mayor capacidad de intercepción de radiación fotosintéticamente activa y, en consecuencia, una mayor producción y distribución de fotoasimilados vía floema hacia los órganos de crecimiento (Barrientos-Llanos et al., 2015). La mayor superficie foliar observada en este tratamiento favoreció la síntesis y translocación de fotosintatos, reflejándose en una mayor acumulación de biomasa y en valores superiores de peso fresco y seco (Taiz et al., 2023). El IAF obtenido concuerda con el reportado por García-Zertuche et al. (2021) en un sistema acuapónico sin fertilización complementaria. Zhang et al. (2025) reportaron que densidades de cultivo bajas o moderadas incrementan la superficie foliar efectiva para interceptar radiación antes del sombreado, lo que favorece la eficiencia fotosintética y el crecimiento vegetal, tal como ocurrió en el presente trabajo.

a LAI of 2.24, possibly associated with physiological responses to stress generated by the C:N ratio (12:1) of the biofloc. This condition favors the growth of heterotrophic bacterial communities that incorporate N into their metabolism to increase microbial biomass and limits plant growth (Hernández-Mancipe et al., 2019).

Regarding performance, T2-Rec reached 10.93 kg·m^{-2} with a tilapia density of 4 kg·m^{-3}, while T1-Bio only registered 0.37 kg·m^{-2} with a tilapia density of 3 kg·m^{-3} (Figure 1). The results obtained with T2-Rec exceed the yields reported by Alcarraz-Quispe et al. (2018) in recirculating aquaponics systems (2.74 kg·m^{-2}) and hydroponics systems (2.57 kg·m^{-2}), as well as those obtained by Dediu et al. (2012) and Pantanella et al. (2012) in hydroponic systems with hydraulic retention and floating rafts (3.76 and 2.71 kg·m^{-2}, respectively). Lennard and Ward (2019) reported 15 lettuce plants per m^2, and T2-Rec achieved 21 lettuce plants per m^2, representing a 40 % higher yield than that obtained by these researchers.

The low performance of T1-Bio may have been related to insufficient maturation of the nitrifying community (Naranjo-Robayo et al., 2025), since the system started in April with 0.028 kg·m^{-3} and ended in May with 3 kg·m^{-3}, a period too short to develop a stable microbial load. Furthermore, although the number of fish was the same in both treatments, the total biomass in T1-Bio was significantly lower ($p < 0.05$), which reduced the generation of metabolic effluents and, therefore, the availability of nutrients for the plants. Al-Zahrani et al. (2023) indicate that low fish densities produce insufficient effluents to maximize plant performance. Likewise, Kasozi et al. (2021) mention that the complete establishment of nitrifying populations can require up to six weeks under controlled conditions.

Nutrients in plant tissue

Significant differences ($p < 0.05$) were observed between treatments in the concentration of N, P, Ca, Mg, and K (Table 2). T2-Rec showed higher concentrations of N, P, Ca, and Mg than T1-Bio, while the K content was higher in T1-Bio (Table 2). The Ca (4.26 %) and Mg (1.41 %) values obtained with T2-Rec coincide with the sufficiency ranges reported by Barrientos-Llanos et al. (2015). Although the N and K concentrations did not reach the optimal levels of 4 and 8 %, respectively, the overall macronutrient balance was sufficient to increase biomass accumulation and yield.

Compared to the values reported by Pineda-Pineda et al. (2018) for the Andromeda and Ruby Sky varieties in aquaponics, the concentrations of N, P, and K obtained in this study were lower, while Ca and Mg were slightly higher. In T1-Bio, the concentrations of Ca (1.70 %) and Mg (1.03 %) were 1.07 and 1.35 % higher, respectively, than those reported by Pineda-Pineda et al. (2018).

Aunque la intensidad lumínica fue constante, la eficiencia fotosintética difirió entre tratamientos. El T1-Bio alcanzó un IAF de 2.24, posiblemente asociado con respuestas fisiológicas al estrés generado por la relación C:N (12:1) del *biofloc*. Esta condición favorece el crecimiento de comunidades bacterianas heterótrofas que incorporaron N en su metabolismo para incrementar la biomasa microbiana y limita el crecimiento vegetal (Hernández-Mancipe et al., 2019).

En cuanto al rendimiento, el T2-Rec alcanzó 10.93 kg·m^{-2} con una densidad de tilapia de 4 kg·m^{-3}, mientras que el T1-Bio registró únicamente 0.37 kg·m^{-2} con una densidad de tilapia de 3 kg·m^{-3} (Figura 1). Los resultados obtenidos con el T2-Rec superan los rendimientos reportados por Alcarraz-Quispe et al. (2018) en sistemas de acuaponía con recirculación (2.74 kg·m^{-2}) e hidroponía (2.57 kg·m^{-2}), así como los obtenidos por Dediu et al. (2012) y Pantanella et al. (2012) en sistemas hidropónicos con retención hidráulica y de balsa flotante (3.76 y 2.71 kg·m^{-2}, respectivamente). Por su parte, Lennard y Ward (2019) reportaron 15 lechugas por m^2 y el T2-Rec alcanzó 21 lechugas por m^2, lo que representa un rendimiento 40 % superior al obtenido por dichos investigadores.

El bajo rendimiento de T1-Bio pudo estar relacionado con la maduración insuficiente de la comunidad nitrificante (Naranjo-Robayo et al., 2025), ya que el sistema inició en abril con 0.028 kg·m^{-3} y finalizó en mayo con 3 kg·m^{-3}, periodo demasiado corto para desarrollar una carga microbiana estable. Por otro lado, aunque el número de peces fue igual en ambos tratamientos, la biomasa total en T1-Bio fue significativamente menor ($p < 0.05$), lo que redujo la generación de efluentes metabólicos y, por lo tanto, la disponibilidad de nutrimentos para las plantas. Al-Zahrani et al. (2023) señalan que densidades bajas de peces producen efluentes insuficientes para maximizar el rendimiento vegetal. Asimismo, Kasozi et al. (2021) mencionan que el establecimiento completo de poblaciones nitrificantes puede requerir hasta seis semanas bajo condiciones controladas.

Nutrimentos en el tejido vegetal

Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos en la concentración de N, P, Ca, Mg y K (Cuadro 2). El T2-Rec presentó mayores concentraciones de N, P, Ca y Mg que el T1-Bio, mientras que el contenido de K fue superior en el T1-Bio (Cuadro 2). Los valores de Ca (4.26 %) y Mg (1.41 %) obtenidos con el T2-Rec coinciden con los rangos de suficiencia reportados por Barrientos-Llanos et al. (2015). Aunque las concentraciones de N y K no alcanzaron los niveles óptimos de 4 y 8 % respectivamente, el balance general de macronutrimentos fue suficiente para incrementar la acumulación de biomasa y el rendimiento.

Table 2. Comparison of means of the nutrient concentrations of lettuce tissue (*Lactuca sativa* var. Sangria) analyzed 21 days after transplanting.

Cuadro 2. Comparación de medias de la concentración de nutrimentos en el tejido de lechuga (*Lactuca sativa* var. Sangria) analizada 21 días después del trasplante.

Treatment / Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	(%)					(mg·kg^{-1})			
T1-Bio	0.45 b	0.12 b	4.74 a	1.70 b	1.03 b	198.79 b	34.76 b	15.33 a	19.53 b
T2-Rec	1.03 a	0.47 a	2.25 b	4.26 a	1.41 a	253.11 a	103.40 a	16.33 a	42.72 a
CV (%)	18.32	21.75	11.83	27.67	8.16	0.41	5.05	3.64	11.20
HSD / DMSH	0.30	0.14	0.93	1.87	0.22	2.13	7.91	1.30	7.90

T1-Bio: aquaponics system based on biofloc technology; T2-Rec: conventional aquaponics system with simple recirculation; CV: coefficient of variation; HSD: honestly significant difference. Different letters in each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple; CV: coeficiente de variación; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Veazie et al. (2024) reported sufficiency ranges for P from 0.58 to 0.96 %, K from 5.72 to 8.82 %, Ca from 1.2 to 2.0 %, Mg from 0.4 to 0.8 %, Fe from 89 to 220 mg·kg^{-1}, Mn from 70.7 to 167.0 mg·kg^{-1}, Cu from 4 to 12 mg·kg^{-1} and Zn from 33.9 to 65.9 mg·kg^{-1}, which places T1-Bio and T2-Rec in the sufficiency range for Ca and Mg. Regarding micronutrients, the lettuces in T2-Rec showed high concentrations of Fe, while Mn and Zn were within the normal range. In contrast, Cu remained above the recommended levels in both treatments (Table 2).

The differences in nutrient concentration between treatments can be attributed to variations in pH, since this parameter regulates the bioavailability and absorption of essential nutrients (Blanchard et al., 2020). In T2-Rec, nutrient accumulation reached sufficient levels, although not all were at optimal concentrations to fully meet the plant's physiological requirements. However, in recirculating aquaponic systems, nutrients remain dynamically available due to the constant supply of organic matter derived from fish feeding (Yang & Kim, 2020).

Composition of the nutrient solution

Significant differences ($p < 0.05$) were found between treatments in the composition of the nutrient solution. T1-Bio showed a higher concentration of N (13.53 mg·L^{-1}) and Ca (46 mg·L^{-1}), while T2-Rec exhibited higher values in K (138.67 mg·L^{-1}) and Mg (172.50 mg·L^{-1}) (Table 3). The higher concentration of N observed in the T1-Bio solution was probably due to the accumulation of autotrophic and heterotrophic ammonium-transforming bacteria, characteristic of biofloc systems. However, during the development of the experiment, the formation of a mucilaginous layer around the roots of T1-Bi was observed, which could act as a diffusive barrier and restrict the efficient absorption of nitrogen and other nutrients by the plants (Hernández-Mancipe et al., 2019).

En comparación con los valores reportados por Pineda-Pineda et al. (2018) en las variedades Andrómeda y Ruby Sky en acuaponía, las concentraciones de N, P y K obtenidas en este estudio fueron menores, mientras que Ca y Mg fueron ligeramente superiores. En el T1-Bio, las concentraciones de Ca (1.70 %) y Mg (1.03 %) fueron 1.07 y 1.35 % superiores, respectivamente, a las registradas por Pineda-Pineda et al. (2018).

Veazie et al. (2024) reportaron rangos de suficiencia para P de 0.58 a 0.96 %, K de 5.72 a 8.82 %, Ca de 1.2 a 2.0 %, Mg de 0.4 a 0.8 %, Fe de 89 a 220 mg·kg^{-1}, Mn de 70.7 a 167.0 mg·kg^{-1}, Cu de 4 a 12 mg·kg^{-1} y Zn de 33.9 a 65.9 mg·kg^{-1}, lo que posiciona al T1-Bio y T2-Rec en el intervalo de suficiencia para Ca y Mg. En cuanto a los micronutrientes, las lechugas del T2-Rec presentaron concentraciones elevadas de Fe, mientras que el Mn y el Zn se encontraron dentro del intervalo. Por el contrario, el Cu se mantuvo por arriba de los niveles recomendados en ambos tratamientos (Cuadro 2).

Las diferencias en la concentración nutrimental entre tratamientos se pueden atribuir a variaciones del pH, ya que este parámetro regula la biodisponibilidad y la absorción de nutrimentos esenciales (Blanchard et al., 2020). En el T2-Rec, la acumulación de nutrimentos alcanzó niveles suficientes, aunque no todos en concentraciones óptimas para satisfacer completamente los requerimientos fisiológicos de la planta. No obstante, en sistemas acuapónicos de recirculación, los nutrimentos permanecen disponibles de manera dinámica debido al suministro constante de materia orgánica derivada de la alimentación de los peces (Yang & Kim, 2020).

Composición de la solución nutritiva

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos en la composición de la solución nutritiva. El T1-Bio presentó mayor concentración de N (13.53 mg·L^{-1}) y Ca (46 mg·L^{-1}), mientras que el T2-Rec exhibió valores superiores en K (138.67 mg·L^{-1}) y Mg

Table 3. Comparison of means of the nutrient concentrations in the nutrient solution of the treatments at harvest time.
Cuadro 3. Comparación de medias de la concentración de nutrimentos en la solución nutritiva de los tratamientos al momento de la cosecha.

Treatment / Tratamiento	$N\text{-}NO_3^-$	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	B	Cu	Zn
	($mg \cdot L^{-1}$)									
T1-Bio	13.53 a	13.43 a	54.00 b	46.00 a	127.97 b	0.53 a	0.02 b	0.08 b	0.02 a	0.01 a
T2-Rec	4.55 b	10.62 a	138.67 a	22.33 b	172.50 a	0.06 b	0.33 a	0.23 a	0.03 a	0.01 a
CV (%)	31.58	12.06	11.92	7.83	7.07	16.44	52.33	11.29	19.24	38.49
HSD / DMSH	6.45	3.29	26.05	6.06	24.08	0.11	0.14	0.04	0.01	0.01

T1-Bio: aquaponics system based on biofloc technology; T2-Rec: conventional aquaponics system with simple recirculation; CV: coefficient of variation; HSD: honestly significant difference. Different letters in each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple; CV: coeficiente de variación; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Although T2-Rec showed a lower concentration of N, the absorption of this nutrient was more efficient, as evidenced by the higher yield obtained with this treatment. Xu et al. (2025) mention that a pH between 6.5 and 7.0 favors N absorption, as well as the presence of N as ammonium ($N\text{-}NH_4$), which coincides with the conditions of T2-Rec. In the case of T1-Bio, approximately 25 % of the NH_4^+ remained in solution and therefore could not be used by the roots to increase biomass and yield (Savvas et al., 2006).

The micronutrients Fe, Mn, and B showed significant differences ($p < 0.05$) between treatments, while Cu and Zn did not vary (Table 3). Although some elements were below the optimal ranges reported by Cadahía-López (2005): Fe from 1.0 to 2.2 $mg \cdot L^{-1}$, Mn from 0.5 to 1.5 $mg \cdot L^{-1}$, and B from 0.3 to 1.0 $mg \cdot L^{-1}$, the concentrations recorded in T2-Rec were sufficient to support adequate plant growth (Table 1).

Delaide et al. (2016) demonstrated that RAS and RAS-D systems can surpass the growth of hydroponic plants with mineral supplementation, reporting the following concentrations: N from 50 to 215.52 $mg \cdot L^{-1}$, P from 7.83 to 52.16 $mg \cdot L^{-1}$, K from 59.51 to 219.31 $mg \cdot L^{-1}$, Ca from 14.72 to 175.09 $mg \cdot L^{-1}$, Mg from 7.36 to 43.02 $mg \cdot L^{-1}$, Fe from 4.47 to 4.40 $mg \cdot L^{-1}$, Mn from 0.50 to 0.66 $mg \cdot L^{-1}$, B from 0.47 to 0.59 $mg \cdot L^{-1}$, Cu from 0.09 to 0.12 $mg \cdot L^{-1}$ and Zn from 0.14 to 0.16 $mg \cdot L^{-1}$. These values serve as a reference and confirm that T2-Rec provides sufficient nutrients for plant development, while T1-Bio requires adjustments in the C:N ratio and in the stabilization of microbial communities.

Water quality and nitrogen dynamics

Water temperature did not show significant differences ($p > 0.05$) between treatments (Table 4), although it was lower than the optimal range of 28 to 32 °C reported for tilapia production (Bonilla-Paz et al., 2018). Despite this, the recorded temperatures allowed for the

(172.50 $mg \cdot L^{-1}$) (Cuadro 3). La mayor concentración de N observada en la solución del T1-Bio probablemente se debió a la acumulación de bacterias autótrofas y heterótrofas transformadoras de amonio, características de los sistemas *biofloc*. Sin embargo, durante el desarrollo del experimento se observó la formación de una capa mucilaginosa alrededor de las raíces del T1-Bi, lo que pudo actuar como una barrera difusiva y restringir la absorción eficiente de nitrógeno y otros nutrimentos por las plantas (Hernández-Mancipe et al., 2019).

Aunque el T2-Rec presentó menor concentración de N, la absorción de este nutrimento fue más eficiente, lo cual se evidenció en el mayor rendimiento obtenido con este tratamiento. Xu et al. (2025) mencionan que un pH entre 6.5 y 7.0 favorece la absorción de N, así como la presencia de N como amonio ($N\text{-}NH_4$), lo cual coincide con las condiciones del T2-Rec. En el caso del T1-Bio, cerca del 25 % del NH_4^+ permaneció en solución, por lo que no pudo ser aprovechado por las raíces para aumentar biomasa y rendimiento (Savvas et al., 2006).

Los micronutrientes Fe, Mn y B mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, mientras que el Cu y Zn no variaron (Cuadro 3). Aunque algunos elementos estuvieron por debajo de los rangos óptimos reportados por Cadahía-López (2005): Fe de 1.0 a 2.2 $mg \cdot L^{-1}$, Mn de 0.5 a 1.5 $mg \cdot L^{-1}$ y B de 0.3 a 1.0 $mg \cdot L^{-1}$, las concentraciones registradas en el T2-Rec fueron suficientes para sostener un adecuado crecimiento vegetal (Cuadro 1).

Delaide et al. (2016) demostraron que los sistemas RAS y RAS-D pueden superar el crecimiento de las plantas en hidroponía con suplementación mineral, al reportar las siguientes concentraciones: N de 50 a 215.52 $mg \cdot L^{-1}$, P de 7.83 a 52.16 $mg \cdot L^{-1}$, K de 59.51 a 219.31 $mg \cdot L^{-1}$, Ca de 14.72 a 175.09 $mg \cdot L^{-1}$, Mg de 7.36 a 43.02 $mg \cdot L^{-1}$, Fe de 4.47 a 4.40 $mg \cdot L^{-1}$, Mn de 0.50 a 0.66 $mg \cdot L^{-1}$, B de 0.47 a 0.59 $mg \cdot L^{-1}$, Cu de 0.09 a 0.12 $mg \cdot L^{-1}$ y Zn de 0.14 a 0.16 $mg \cdot L^{-1}$. Estos valores sirven como referencia y

overall functioning of the aquaponic system and the development of the organisms involved.

The pH and EC showed significant differences ($p < 0.05$) between treatments (Table 4). In T2-Rec, pH ranged from 6.2 to 8, while in T1-Bio it remained between 8.0 and 8.7 (Figure 2). According to Lennard and Goddek (2019), a pH between 7 and 8.5 favors the absorption of N, K, P, S, Mg, Ca, and Mo, in addition to stimulating the activity of nitrifying bacteria responsible for the conversion of ammonium to nitrate (Suhl et al., 2016). Likewise, Pineda-Pineda et al. (2017) point out that high pH values keep the cation available, while values close to neutrality are suitable for nutrient absorption.

Regarding EC, T2-Rec showed values from 1.21 to 2.15 $dS \cdot m^{-1}$, remaining within the range considered suitable for lettuce cultivation in hydroponic systems (1.5 to 2.5 $dS \cdot m^{-1}$) (Dalastra et al., 2025). In contrast, T1-Bio had lower values (from 0.79 to 1.25 $dS \cdot m^{-1}$), which is attributed to the interaction between the high pH (8.36) and the low temperature (24 °C), conditions that can decrease mineralization and nutrient availability.

The differences observed in the concentrations of Ca, K, and Mg were also influenced by the pH of the solution. In T2-Rec, the average pH of 6.26 favored the absorption of K and Mg (138.67 and 172.50 $mg \cdot L^{-1}$, respectively), resulting in significantly higher concentrations compared to T1-Bio (54.00 and 127.97 $mg \cdot L^{-1}$, respectively) (Table 3). Although the Mg concentration exceeded some reference ranges reported by Pineda-Pineda et al. (2017), no symptoms of toxicity were observed in plants or fish, probably due to the organic origin of the feed.

The DO did not show significant differences in the first three samplings ($p > 0.05$). However, in T2-Rec,

Calidad de agua y dinámica del nitrógeno

La temperatura del agua no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos (Cuadro 4), aunque fue inferior al rango óptimo de 28 a 32 °C reportado para la producción de tilapia (Bonilla-Paz et al., 2018). A pesar de ello, las temperaturas registradas permitieron el funcionamiento general del sistema acuapónico y el desarrollo de los organismos involucrados.

El pH y la CE mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos (Cuadro 4). En el T2-Rec, el pH osciló entre 6.2 y 8, mientras que en el T1-Bio se mantuvo entre 8.0 y 8.7 (Figura 2). De acuerdo con Lennard y Goddek (2019), un pH entre 7 y 8.5 favorece la absorción de N, K, P, S, Mg, Ca y Mo, además de estimular la actividad de bacterias nitrificantes responsables de la conversión de amonio a nitrato (Suhl et al., 2016). Asimismo, Pineda-Pineda et al. (2017) señalan que valores de pH elevados mantienen disponible el catión, mientras que valores cercanos a la neutralidad son adecuados para la absorción nutrimental.

En cuanto a la CE, el T2-Rec presentó valores de 1.21 a 2.15 $dS \cdot m^{-1}$, manteniéndose dentro del intervalo considerado adecuado para el cultivo de lechuga en sistemas hidropónicos (1.5 a 2.5 $dS \cdot m^{-1}$) (Dalastra et al., 2025). Por el contrario, el T1-Bio tuvo valores inferiores (de 0.79 a 1.25 $dS \cdot m^{-1}$), lo cual se atribuye a la interacción entre el pH elevado (8.36) y la temperatura baja (24 °C), condiciones que pueden disminuir la mineralización y disponibilidad nutrimental.

Table 4. Comparison of means of the physicochemical parameters evaluated in the nutrient solution 21 days after transplanting.
Cuadro 4. Comparación de medias de los parámetros fisicoquímicos evaluados en la solución nutritiva 21 días después del trasplante.

Treatment / Tratamiento	Temp (°C)	pH	EC ($dS \cdot m^{1}$) / CE ($dS \cdot m^{1}$)	DO ($mg \cdot L^{-1}$) / OD ($mg \cdot L^{-1}$)	Ammonium ($mg \cdot L^{-1}$) / Amonio ($mg \cdot L^{-1}$)	Nitrites ($mg \cdot L^{-1}$) / Nitritos ($mg \cdot L^{-1}$)	Nitrates ($mg \cdot L^{-1}$) / Nitratos ($mg \cdot L^{-1}$)
T1-Bio	24.00 a	8.36 a	1.25 b	4.40 a	0.10 b	0.30 b	50.00 b
T2-Rec	27.00 a	6.26 b	2.15 a	4.56 a	1.60 a	2.16 a	110.00 a
CV (%)	5.61	5.35	3.08	10.50	57.65	56.27	0.00
HSD / DMSH	3.29	0.88	0.11	1.06	1.11	1.57	0.00

Temp: temperature; EC: electrical conductivity; DO: dissolved oxygen; T1-Bio: aquaponics system based on biofloc technology; T2-Rec: conventional aquaponics system with simple recirculation; CV: coefficient of variation; HSD: honestly significant difference. Different letters in each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

Temp: temperatura; CE: conductividad eléctrica; OD: oxígeno disuelto; T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple; CV: coeficiente de variación; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

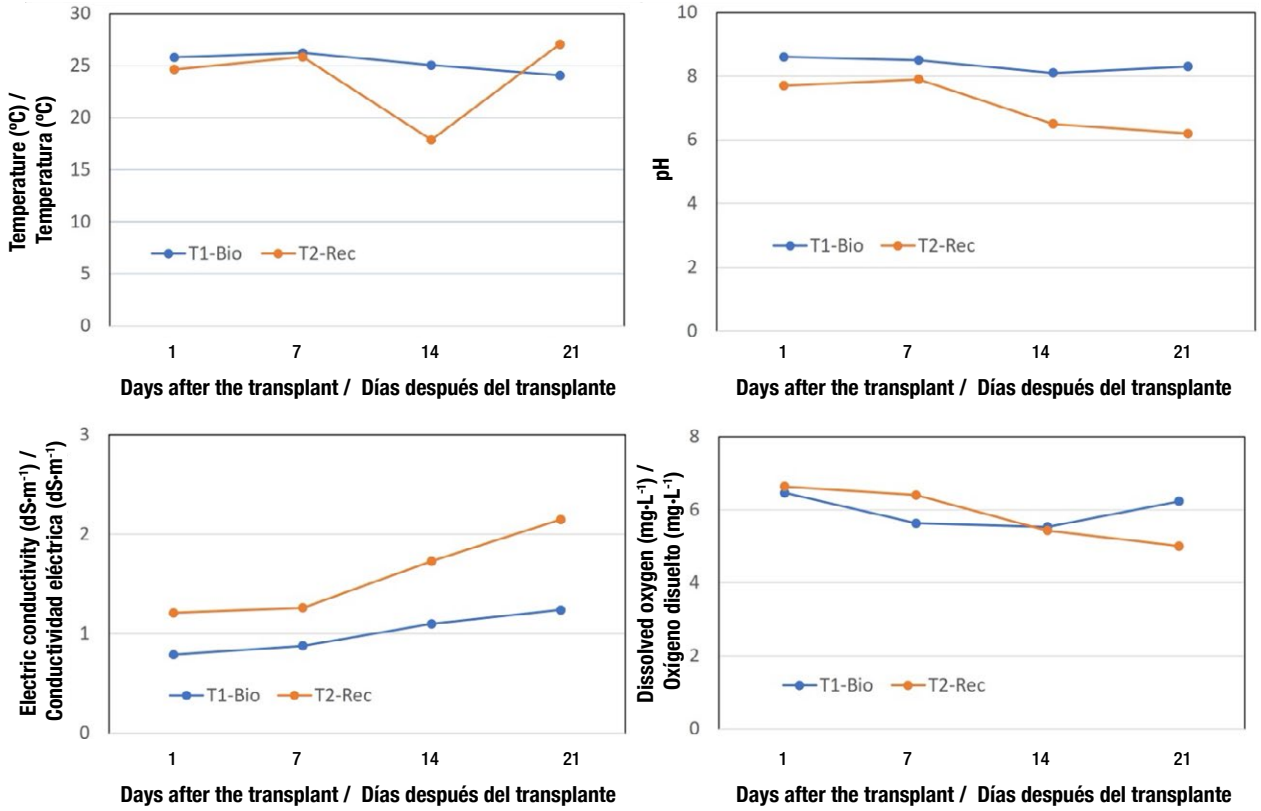


Figure 2. Physicochemical parameters evaluated in the nutrient solution during the experiment. T1-Bio: aquaponics system based on biofloc technology; T2-Rec: conventional aquaponics system with simple recirculation.

Figura 2. Parámetros fisicoquímicos evaluados en la solución nutritiva durante el experimento. T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple.

the DO concentration decreased from 6.3 to 5.0 mg·L^{-1}, while T1-Bio maintained relatively stable values of 6.5 to 6.2 mg·L^{-1} (Figure 2). This response can be attributed to the biomass and metabolic activity in T2-Rec, since temperature and DO are inversely proportional (Lennard & Ward, 2019). The increased oxygen consumption associated with the growth of fish and microorganisms can simultaneously alter the pH balance and system dynamics. Implementing tank splitting would be appropriate to standardize fish size and balance biomass, considering DO, EC, and pH as key factors in the growth and performance of fish, plants, and microorganisms (Yang & Kim, 2020).

Ammonium, nitrite, and nitrate concentrations showed significant differences ($p < 0.05$) between treatments in the last sampling (Table 4; Figure 3). While the ammonium concentration in T1-Bio decreased from 0.43 to 0.1 mg·L^{-1}, in T2-Rec it increased from 0.3 to 1.6 mg·L^{-1}. Likewise, nitrite and nitrate levels in T2-Rec were 7.2 and 11 times higher, respectively, than those in T1-Bio (Figure 3). This indicates that in T2-Rec the mineralization and nitrification processes occurred completely, probably due to the *tezontle* bed used as a

Las diferencias observadas en las concentraciones de Ca, K y Mg también estuvieron influenciadas por el pH de la solución. En el T2-Rec, el pH promedio de 6.26 favoreció la absorción de K y Mg (138.67 y 172.50 mg·L^{-1}, respectivamente), reflejándose en concentraciones significativamente superiores con respecto al T1-Bio (54.00 y 127.97 mg·L^{-1}, respectivamente) (Cuadro 3). Aunque la concentración de Mg superó algunos rangos de referencia reportados por Pineda-Pineda et al. (2017), no se observaron síntomas de toxicidad en plantas ni peces, probablemente debido al origen orgánico del alimento.

El OD no presentó diferencias significativas en los tres primeros muestreos ($p > 0.05$). Sin embargo, en el T2-Rec la concentración de OD disminuyó de 6.3 a 5.0 mg·L^{-1}, mientras que el T1-Bio mantuvo valores relativamente estables de 6.5 a 6.2 mg·L^{-1} (Figura 2). Esta respuesta se puede atribuir a la biomasa y a la actividad metabólica en T2-Rec, ya que la temperatura y el OD son inversamente proporcionales (Lennard & Ward, 2019). El mayor consumo de oxígeno asociado con el crecimiento de peces y microorganismos puede modificar simultáneamente el equilibrio del pH y la dinámica del sistema. Lo adecuado sería implementar desdoble en los tanques para uniformizar la talla de los

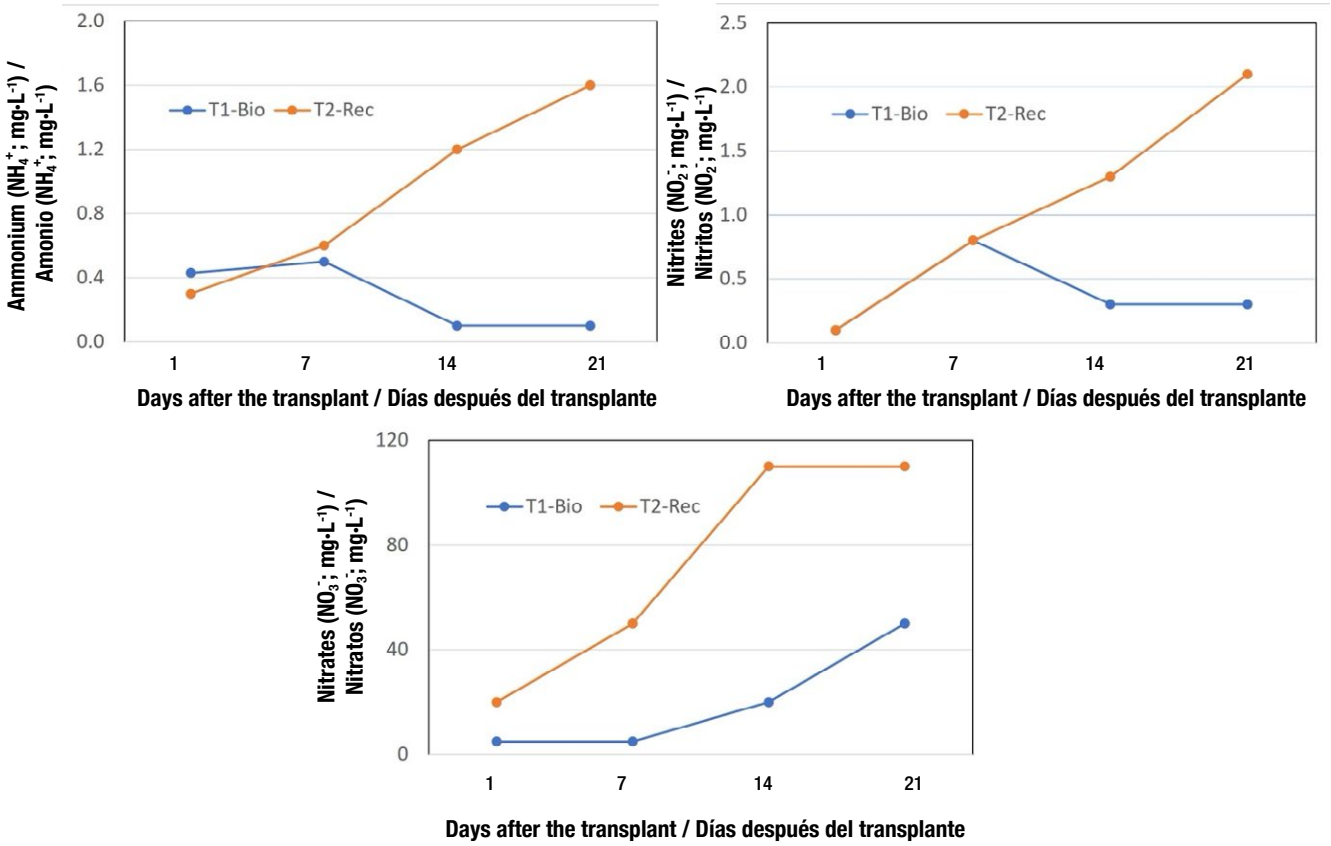


Figure 3. Concentrations of ammonium, nitrites, and nitrates in the nutrient solution during the experiment. T1-Bio: aquaponics system based on biofloc technology; T2-Rec: conventional aquaponics system with simple recirculation.

Figura 3. Concentraciones de amonio, nitritos y nitratos en la solución nutritiva durante el experimento. T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple.

biological filter. Valenzuela-Antelo et al. (2023) reported that the use of *tezontle* with a particle size <1 cm significantly increased the final weight of the lettuce compared to the use of particles >5 cm.

In contrast, the 12:1 C:N ratio in T1-Bio favored the proliferation of heterotrophic bacteria capable of removing ammonium, but the low efficiency of ammonium (NH_4^+) oxidation resulted in lower nitrate (NO_3^-) concentrations (Xu et al., 2016). In aquaponics, nitrate is the main assimilable form of N, while ammonium, at high concentrations, can cause toxicity and inhibit the absorption of K^+, Ca^{2+}, and Mg^{2+} (Taiz et al., 2023). Conversely, the high nitrate levels recorded in the T2-Rec (Figure 3) do not generate toxicity, since they can be stored in vacuoles and metabolized via GS-GOGAT (Cockx & Simonne, 2003).

The results suggest that the performance of aquaponics systems depends on the interaction between the surface area of plant cultivation (Jiménez-Márquez & Pérez-García, 2023), the hydraulic design, the capacity of the biological filter (Suhl et al., 2018) and the density of the fish, which can vary from 10 to 15 kg·m^{-3} for semi-intensive crops and from 25 to 30 kg·m^{-3} in large-

peces y equilibrar la biomasa con OD, CE y pH como factores clave en el crecimiento y el rendimiento de peces, plantas y microorganismos (Yang & Kim, 2020).

Las concentraciones de amonio, nitritos y nitratos presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos en el último muestreo (Cuadro 4; Figura 3). Mientras la concentración de amonio en el T1-Bio disminuyó de 0.43 a 0.1 mg·L^{-1}, en el T2-Rec aumentó de 0.3 a 1.6 mg·L^{-1}. Asimismo, en el T2-Rec se registraron niveles de nitritos y de nitratos 7.2 y 11 veces superiores, respectivamente, a los del T1-Bio (Figura 3). Esto indica que en el T2-Rec los procesos de mineralización y nitrificación ocurrieron de forma completa, probablemente debido a la cama de tezontle utilizada como filtro biológico. Valenzuela-Antelo et al. (2023) reportaron que el uso de tezontle con granulometría <1 cm incrementó significativamente el peso final de la lechuga en comparación con el uso de partículas >5 cm.

En contraste, la relación C:N de 12:1 en el T1-Bio favoreció la proliferación de bacterias heterótrofas capaces de remover amonio, pero la baja eficiencia de oxidación de amonio (NH_4^+) resultó en menores concentraciones de nitrato (NO_3^-) (Xu et al., 2016). En

scale crops (Pineda-Pineda et al., 2018). In this regard, Jiménez-Márquez and Pérez-García (2023) suggest that the optimal ratio of plant surface area to aquaculture volume should be 10:1; however, in both treatments, a ratio of 6:1 was used. In addition, in T2-Rec, sieved *tezontle* was used as a biological filter, while in T1-Bio, high-density polyethylene mesh was used.

Crab et al. (2012) mention that the accumulation of heterotrophic bacteria improves water quality for fish, since for every 8 g of bacterial biomass 0.6 $mg \cdot L^{-1}$ of total ammonia nitrogen is removed, in direct proportion to the C:N balance, provided that it does not exceed 20:1. To optimize this balance, other carbon sources could be evaluated such as sorghum flour, wheat, starch, or even organic alternatives such as humus, organic vinegar, cassava or water lettuce (Hernández-Mancipe et al., 2019).

Although the biofloc system showed potential to improve water quality, a more detailed characterization of the microbial communities present in the root zone is suggested to more accurately understand the relationship between nutrient availability and absorption within the system.

Conclusions

The conventional simple recirculation aquaponic system (T2-Rec) showed greater productive efficiency than the system with biofloc technology (T1-Bio), achieving an average yield of 10.93 $kg \cdot m^{-2}$ and a harvest density of 21 lettuces per m^2. The T2-Rec treatment adequately integrated biotic and abiotic components, creating a favorable environment for plant development and biomass accumulation. In contrast, the T1-Bio treatment showed substantial limitations in plant biomass production, with an average yield of 0.37 $kg \cdot m^{-2}$, suggesting that, under the conditions and duration of this study, biofloc technology failed to maximize lettuce yield in decoupled aquaponic systems.

Acknowledgments

The first author acknowledges and thanks the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (CONACyT), now the *Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación* (SECIHTI), for the financial support provided for the completion of master's studies.

Declaration of conflict of interest

The authors declare that we have no known economic conflicts of interest or personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

acuaponía, el nitrato es la principal forma asimilable de N, mientras que el amonio, en concentraciones elevadas, puede generar toxicidad e inhibir la absorción de K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+} (Taiz et al., 2023). Por el contrario, los niveles elevados de nitrato registrados en el T2-Rec (Figura 3) no generan toxicidad, ya que se pueden almacenar en vacuolas y metabolizarse vía GS-GOGAT (Cockx & Simonne, 2003).

Los resultados sugieren que el desempeño de los sistemas de acuaponía depende de la interacción entre la superficie de cultivo vegetal (Jiménez-Márquez & Pérez-García, 2023), el diseño hidráulico, la capacidad del filtro biológico (Suhl et al., 2018) y la densidad de los peces, que puede variar de 10 a 15 $kg \cdot m^{-3}$ para cultivos semintensivos y de 25 a 30 $kg \cdot m^{-3}$ en cultivos a gran escala (Pineda-Pineda et al., 2018). En este sentido, Jiménez-Márquez y Pérez-García (2023) sugieren que la proporción óptima de la superficie vegetal y el volumen acuícola debe ser de 10:1; sin embargo, en ambos tratamientos se manejó una relación de 6:1. Además, en el T2-Rec se empleó tezontle cribado como filtro biológico, mientras que en el T1-Bio se utilizó malla de polietileno de alta densidad.

Crab et al. (2012) mencionan que la acumulación de bacterias heterótrofas mejora la calidad del agua para los peces, ya que por cada 8 g de biomasa bacteriana se remueven 0.6 $mg \cdot L^{-1}$ de nitrógeno amoniacal total, en proporción directa con el balance C:N, siempre que no exceda de 20:1. Para optimizar este balance, se podrían evaluar otras fuentes de carbono como harina de sorgo, trigo, almidón, o incluso alternativas orgánicas como humus, vinagre orgánico, yuca o lechuga de agua (Hernández-Mancipe et al., 2019).

Aunque el sistema *biofloc* mostró potencial para mejorar la calidad del agua, se sugiere realizar una caracterización más detallada de las comunidades microbianas presentes en la zona radicular para comprender con mayor precisión la relación entre la disponibilidad y la absorción de nutrimentos dentro del sistema.

Conclusiones

El sistema acuapónico convencional de recirculación simple (T2-Rec) presentó mayor eficiencia productiva que el sistema con tecnología *biofloc* (T1-Bio), al alcanzar un rendimiento promedio de 10.93 $kg \cdot m^{-2}$ y una densidad de cosecha de 21 lechugas por m^2. El T2-Rec integró adecuadamente los componentes bióticos y abióticos, lo que generó un entorno favorable para el desarrollo vegetal y la acumulación de biomasa. En contraste, el T1-Bio mostró limitaciones sustanciales en la producción de biomasa vegetal, con un rendimiento

AI use statement

The authors declare that they have not used generative AI or AI-assisted technologies for the development of this contribution.

End of English version

References / Referencias

Al-Zahrani, M. S., Hassanien, H. A., Alsaade, F. W., & Wahsheh, H. A. M. (2023). Effect of stocking density on sustainable growth performance and water quality of Nile tilapia-spinach in NFT aquaponic system. *Sustainability*, *15*(8), 6935. https://doi.org/10.3390/su15086935

Alcarraz-Quispe, E. W., Tapia-Figueras, M. L., Bustamante-Pezoa, A., Tapia-Laguna, O., Wacyk-Gonzales, J., & Escalona-Contreras, V. H. (2018). Evaluación de la concentración de nitratos, calidad microbiológica y funcional en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. *Anales Científicos*, *79*(1), 101–110. https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1145

Barrientos-Llanos, H., del Castillo-Gutiérrez, C. R., & García-Cárdenas, M. (2015). Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, *2*(1), 76–86. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2409-16182015000100010&script=sci_arttext

Betanzo-Torres, E. A., Marín-Muñiz, J. L., Piñar-Álvarez, M., Celdrán-Sabater, D., & Mata-Alejandro, H. (2019). Desarrollo de la acuacultura con tecnología biofloc para producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en regiones rurales de México. *Rinderesu, 4*(1-2), 42–58. http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/40

Blanchard, C., Wells, D. E., Pickens, J. M., & Blersch, D. M. (2020). Effect of pH on cucumber growth and nutrient availability in a decoupled aquaponic system with minimal solids removal. *Horticulturae*, *6*(1), 10. https://doi.org/10.3390/horticulturae6010010

Bonilla-Paz, B. L., Montoya-Bonilla, B., Gómez, J., & Caja, Á. (2018). Efecto de la temperatura sobre el crecimiento de tilapia (*Oreochromis* sp) en Mamá Lombriz, vereda Rio Blanco, Popayán, Colombia. *Teknos Revista Científica, 18*(1), 24–30. https://doi.org/10.25044/25392190.922

Cadahía-López, C. (2005). *Fertirrigación: cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Mundi-Prensa. https://books.google.com.mx/books?id=wRpfAwAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Cockx, E. M., & Simonne, E. H. (2003). Reduction of the impact of fertilization and irrigation on processes in the nitrogen cycle in vegetable fields with BMPs: HS948 HS201, 9 2003. *University of Florida*, *9*(18), 22–29. https://doi.org/10.32473/edis-hs201-2003

Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, *356*, 351–356. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.046

Dalastra, C., da Silva-Oliveira, C. E., Fernandes, G. C., Jalal, A., de Souza, M. C., da Silva, E. C., & Teixeira-Filho, M. C. (2025). Yield and nutrient use efficiency of lettuce grown at different electrical conductivity levels of hydroponic solutions. *International Journal of Vegetable Science*, *32*(1), 115–138. https://doi.org/10.1080/19315260.2025.2564829

Dediu, L., Cristea, V., & Xiaoshuan, Z. (2012). Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. *African Journal of Biotechnology*, *11*(9), 2349–2358. https://doi.org/10.5897/AJB11.2829

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. *Water, 8*(10), 467. https://doi.org/10.3390/w8100467

Estrada, F., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O., & Botzen, W. (2022). Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change*, *22*(4), 126. https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0

García-Zertuche, M. F., Sandoval-Rangel, A., Robledo-Torres, V., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., & Cabrera-de la Fuente, M. (2021). Rentabilidad y rendimiento agronómico de lechuga acuapónica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *26*, 119–130. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2942

promedio de 0.37 kg·m^{-2}, lo que sugiere que, bajo las condiciones y la duración del presente estudio, la tecnología *biofloc* no logró maximizar el rendimiento de lechuga en sistemas acuapónicos desacoplados.

Agradecimientos

La primera autora reconoce y agradece el apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), para la realización de estudios de maestría.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

Declaración del uso de IA

Los autores declaramos no haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA para el desarrollo de la presente contribución.

Fin de la versión en español

Hernández-Mancipe, L. E., Londoño-Velez, J. I., Hernández-García, K. A., & Torres-Hernández, L. C. (2019). Los sistemas biofloc: una estrategia eficiente en la producción acuícola. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 14*(1), 70–99. https://doi.org/10.21615/cesmvz.14.1.6

Jiménez-Márquez, O., & Pérez-García, A. R. (2023). Acuaponía: Una forma potencial y sustentable de cultivar de manera eficiente y sustentable alimentos. *Journal of Agricultural Sciences Research, 3*(1), 1–19. https://doi.org/10.22533/at.ed.973312222128

Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. *Annals of Microbiology*, *71*(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/s13213-020-01613-5

Kozak, M., Bocianowski, J., & Rybinski, W. (2013). Note on the use of coefficient of variation for data from agricultural factorial experiments. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, *19*(4), 644–646. https://www.agrojournal.org/19/04-03.pdf

Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: the basics. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems* (pp. 113–143). Springer Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6

Lennard, W., & Ward, J. (2019). A comparison of plant growth rates between an NFT hydroponic system and an NFT aquaponic system. *Horticulturae, 5*(2), 27. https://doi.org/10.3390/horticulturae5020027

Lu, Z., Deng, L., & Lu, H. (2022). An improved LAI estimation method incorporating with growth characteristics of field-grown wheat. *Remote Sensing*, *14*(16), 4013. https://doi.org/10.3390/rs14164013

Modarelli, G. C., Cirillo, C., Vanacore, L., Langellotti, A. L., Masi, P., de Pascale, S., & Rouphael, Y. (2022). Recirculating aquaponics systems: the new era of food production. *Acta Horticulturae, 1345,* 215–220. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1345.29

Monsees, H., Suhl, J., Paul, M., Kloas, W., Dannehl, D., & Würtz, S. (2019). Lettuce (*Lactuca sativa,* V. 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), e0218368. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218368

Moreno-Simón, E. W., & Zafra-Trelles, A. (2014). Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactuca sativa*, con efluentes de cultivo de tilapia. *REBIOL*, *34*(2), 60-72. https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/facccbiol/article/view/770

Naranjo-Robayo, N., Castro-González, M., & Gómez-Ramírez, E. (2025). Quantification and characterization of nitrifying bacteria isolated from an aquaponic system. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, *28*(1), e2653. https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2653

Nishanth, D., Nair, C. S., Manoharan, R., Subramanian, R., Salim, I., Maqsood, S., & Jaleel, A. (2025). Current technologies for nutrient recovery in aquaponic systems: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*, 1–21 https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1681638

Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. *Acta Horticulturae*, *927*, 887–893. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109

Pineda-Pineda, J., Miranda-Velázquez, I., Rodríguez-Pérez, J. E., Ramírez-Arias, J. A., Pérez-Gómez, E. A., García-Antonio, I. N., & Morales-Parada, J. J. (2017). Nutrimental balance in aquaponic lettuce production. *Acta Horticulturae*, *1170*, 1093–1100. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.141

Pineda-Pineda, J., Valdez-Zamora, A., Miranda-Velázquez, I., Rodríguez-Pérez, J. E., Ramírez-Arias, J. A., & Lozano-Toledano, A. (2018). Yield of two cultivars of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in hydroponic and aquaponic systems. *Acta Horticulturae*, *1227,* 347–354. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.43

Saavedra-Rincón, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). *Manual de producción de lechuga*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/e96ddc42-19df-4be3-85cc-ae0f6b0c3dcc/content

SAS Institute Inc. (2023). *User's guide* (ver. 9.4) [software]. SAS Institute, Inc. https://www.sas.com/es_mx/home.html

Savvas, D., Passam, H. C., Olympios, C., Nasi, E., Moustaka, E., Mantzos, N., & Barouchas, P. (2006). Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. *HortScience*, *41*(7), 1667–1673. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.7.1667

Suhl, J., Dannehl, D., Baganz, D., Schmidt, U., & Kloas, W. (2018). An innovative suction filter device reduces nitrogen loss in double-recirculating aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, *82*, 63–72. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.06.008

Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Schiebe, G. & Schmidt, U. (2016). Advanced Aquaponics: evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agric Water Management*, *178*, 335–344. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, M. I., & Murphy, A. (2023). *Plant physiology and development*. Sinauer Associates, Inc. https://sirsyedcollege.ac.in/crm/public/uploads/download_image/H8aTDrHeKuTogISO7SE1r80gjP2dmU.pdf

Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., Baca-Castillo, G. A., & Tejeda-Sartorius, O. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *4*(5), 863–876. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342013000900001&script=sci_arttext

Urías-Sotomayor, R., Maeda-Martínez, A. N., Garza-Torres, R., García-Morales, R., & Navarro-Murillo, R. (2022). Análisis de la producción de crías de tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) en instalaciones acuícolas en México de 2014-2021. *AquaTechnica*, *4*(1), 1-6. https://doi.org/10.5281/zenodo.6360811

Valenzuela-Antelo, A., Sandoval-Villa, M., Almaraz-Suárez, J. J., Alcántar-González, G., & Bórquez-López, R. (2023). Efecto de la granulometría del tezontle en tomate (*Solanum*

lycopersicum L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) en acuaponía. *Revista Terra Latinoamericana*, *41*, e1598. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1598

Veazie, P., Chen, H., Hicks, K., Holley, J., Eylands, N., Mattson, N., Boldt, J., Brewer, D., Lopez, R., & Whipker, B. E. (2024). A data-driven approach for generating leaf tissue nutrient interpretation ranges for greenhouse lettuce. *HortScience*, *59*(3), 267–277. https://doi.org/10.21273/HORTSCI17582-23

Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., & Román-Sánchez, I. M. (2018). Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. *Sustainability*, *10*(4), 1084. https://doi.org/10.3390/su10041084

Wongkiew, S., Park, M. R., Chandran, K., & Khanal, S. K. (2018). Aquaponic systems for sustainable resource recovery: linking nitrogen transformations to microbial communities. *Environmental Science & Technology. 52*(21), 12728–12739. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04177

Xu, J., Che, G., Yan, J., Luo, Y., Good, A., Yuan, T., Lei, Z., Zhang, Z., & Shizumi, K. (2025). Optimizing nitrogen form ratio for enhanced nutrient uptake and lettuce performance in hydroponic systems. *Bioresource Technology Reports*, *32*, 102384. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102384

Xu, W. J., Morris, T. C., & Samocha, T. M. (2016). Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. *Aquaculture, 453,* 169–175. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.021

Yang, T., & Kim, H. J. (2020). Characterizing nutrient composition and concentration in tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. *Water*, *12*(5), 1259. https://doi.org/10.3390/w12051259

Zhang, H., Miao, C., Zhu, C., Ding, X., Yang, S., Chang, L., & Jiang, Y. (2025). Effects of different cultivation facilities and planting densities on tomato seedling production. *HortScience*, *60*(7), 1065–1074. https://doi.org/10.21273/HORTSCI18568-25