



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

Claudia Lorena Cerón-Argüelles (<https://orcid.org/0009-0005-0278-4472>)

Raquel Salazar-Moreno (<https://orcid.org/0000-0001-6429-3824>)

Joel Pineda-Pineda* (<https://orcid.org/0000-0002-7643-8987>)

Luis Fernando Contreras-Cruz (<https://orcid.org/0000-0003-4226-1121>)

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

*Autor para correspondencia: pinedapjoel@yahoo.com.mx

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 de acuaponía convencional con recirculación simple (T2-Rec) y en un sistema basado en tecnología *biofloc* (T1-Bio). 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 ($253.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Mn ($103.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). En la solución nutritiva, T1-Bio mostró concentraciones superiores de N ($13.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), P ($13.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Ca ($46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y Fe ($0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), mientras que T2-Rec registró concentraciones mayores de K ($138.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Mg ($172.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Mn ($0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y B ($0.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 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.

Recibido: 18/09/2025

Aceptado: 16/04/2026

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 (Urias-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 acuapónico convencional y en un sistema basado en tecnología biofloc, utilizando tilapia como especie acuícola. Asimismo, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de la solución nutritiva y el contenido nutrimental del tejido foliar.

Materiales y métodos

Sitio experimental



El estudio se desarrolló en un invernadero de 195 m² 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 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. Sangría 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 m².

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 (cm²) 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):

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

El peso fresco (g) de las muestras se determinó con una balanza digital con precisión de 0.01 g. Posteriormente, 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·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·planta⁻¹) y *D* es la densidad (plantas·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 (H₂PO₄⁻) 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 $\pm 0.01 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 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 fluctuaron entre 4.46 y 15.34 % (Cuadro 1), lo que evidencia una baja variabilidad entre repeticiones y un adecuado control de las condiciones experimentales. En particular, las variables largo y ancho foliar presentaron valores de CV inferiores a 5 %.

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.



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

Tratamientos	Número hojas	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área foliar (cm ²)	IAF	Peso fresco (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
DMSH	4.62	1.32	0.98	740.14	10.28	45.15	11.57

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, $p \leq 0.05$).

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.

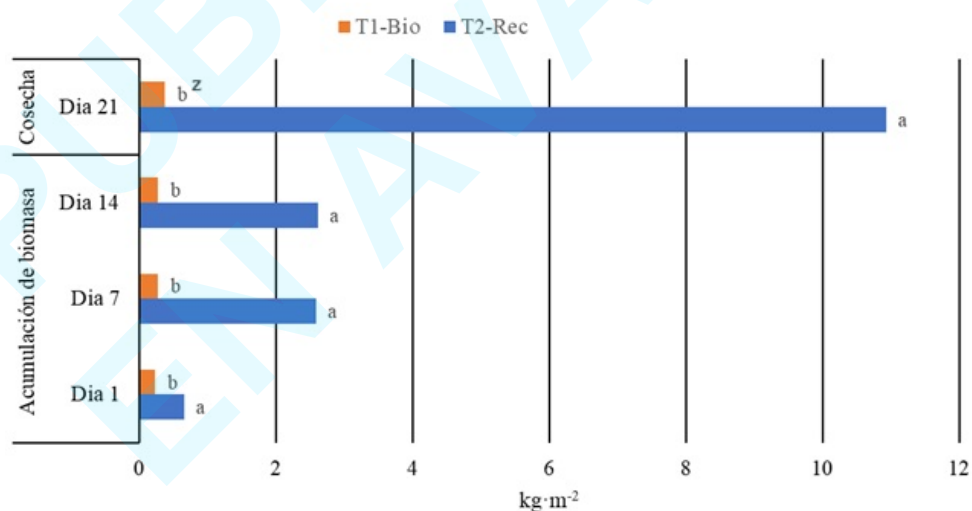
El T2-Rec presentó el mayor IAF (64.26), lo cual indica una mayor capacidad de intercepción de radiación fotosintéticamente activa y, en consecuencia, una mayor producción y distribución de fotoasimilados vía floema hacia los órganos de crecimiento (Barrientos-Llanos et al., 2015). La mayor superficie 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.

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 $10.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ con una densidad de tilapia de $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, mientras que el T1-Bio registró únicamente $0.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ con una densidad de tilapia de $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (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 ($2.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) e hidroponía ($2.57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), 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 $2.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente). Por su parte, Lennard y Ward (2019) reportaron 15 lechugas por m^2 , mientras que el T2-Rec alcanzó 21 lechugas por m^2 , lo que representa un rendimiento 40 % superior al obtenido por dichos investigadores.



	Dia 1	Dia 7	Dia 14	Dia 21
C.V. (%)	10.66	23.82	20.98	12.33
DMSH	180.05	1290.4	1149.1	2634



Figura 1. Comparación de medias del rendimiento promedio de lechuga (*Lactuca sativa* var. Sangría) 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, $p \leq 0.05$).

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 $0.028 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y finalizó en mayo con $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 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 nutrientes 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.

Nutrientes 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 macronutrientes fue suficiente para incrementar la acumulación de biomasa y el rendimiento.



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).

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

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
DMSH	0.30	0.14	0.93	1.87	0.22	2.13	7.91	1.30	7.90

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) 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 micronutrimentos, 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 ($13.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y Ca ($46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), mientras que el T2-Rec exhibió valores superiores en K ($138.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y Mg ($172.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (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).

Cuadro 3. Comparación de medias de la concentración de nutrimentos en la solución nutritiva de los tratamientos al momento de la cosecha.

Tratamientos	N-NO ₃ ⁻	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	B	Cu	Zn
	(mg·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
DMSH	6.45	3.29	26.05	6.06	24.08	0.11	0.14	0.04	0.01	0.01



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, $p \leq 0.05$).

Aunque el T2-Rec presentó menor concentración de N, la absorción de este nutriente 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-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 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mn de 0.5 a 1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y B de 0.3 a 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 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 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, P de 7.83 a 52.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, K de 59.51 a 219.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Ca de 14.72 a 175.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mg de 7.36 a 43.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe de 4.47 a 4.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mn de 0.50 a 0.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, B de 0.47 a 0.59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Cu de 0.09 a 0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y Zn de 0.14 a 0.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Estos valores sirvieron como referencia y confirman que el T2-Rec ofrece nutrientes suficientes para el desarrollo de la planta, mientras que el T1-Bio requiere ajustes en la relación C:N y en la estabilización de las comunidades microbianas.

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

Cuadro 4. Comparación de medias de los parámetros fisicoquímicos evaluados en la solución nutritiva 21 días después del trasplante.

Tratamientos	Temp (°C)	pH	CE (dS·m ⁻¹)	OD (mg·L ⁻¹)	Amonio (mg·L ⁻¹)	Nitritos (mg·L ⁻¹)	Nitratos (mg·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
DMSH	3.29	0.88	0.11	1.06	1.11	1.57	0.00

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, $p \leq 0.05$).

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.

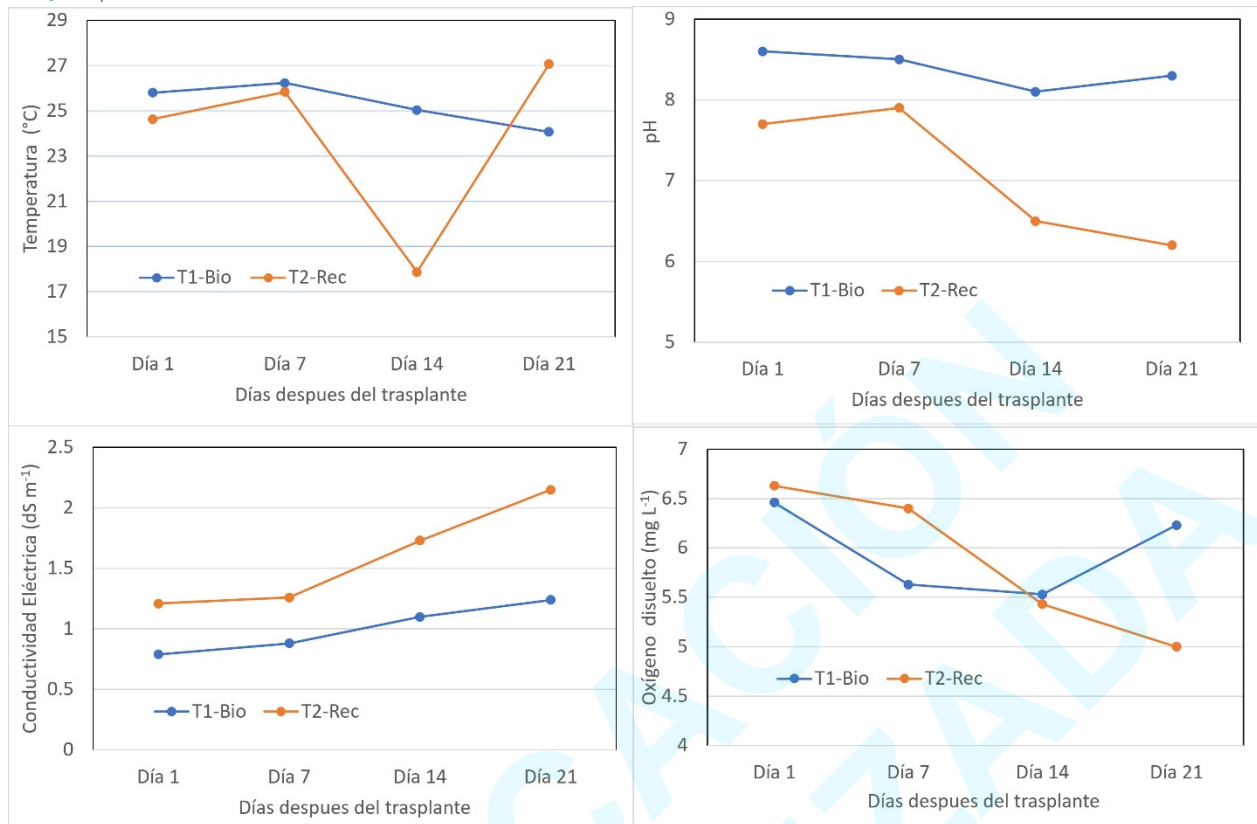


Figura 2. Parámetros fisicoquímicos evaluados en la solución nutritiva durante el experimento.

T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple.

En cuanto a la CE, el T2-Rec presentó valores de 1.21 a 2.15 dS·m⁻¹, manteniéndose dentro del intervalo considerado adecuado para el cultivo de lechuga en sistemas hidropónicos (1.5 y 2.5 dS·m⁻¹) (Dalastra et al., 2025). Por el contrario, el T1-Bio tuvo valores inferiores (de 0.79 a 1.25 dS·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.

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 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.

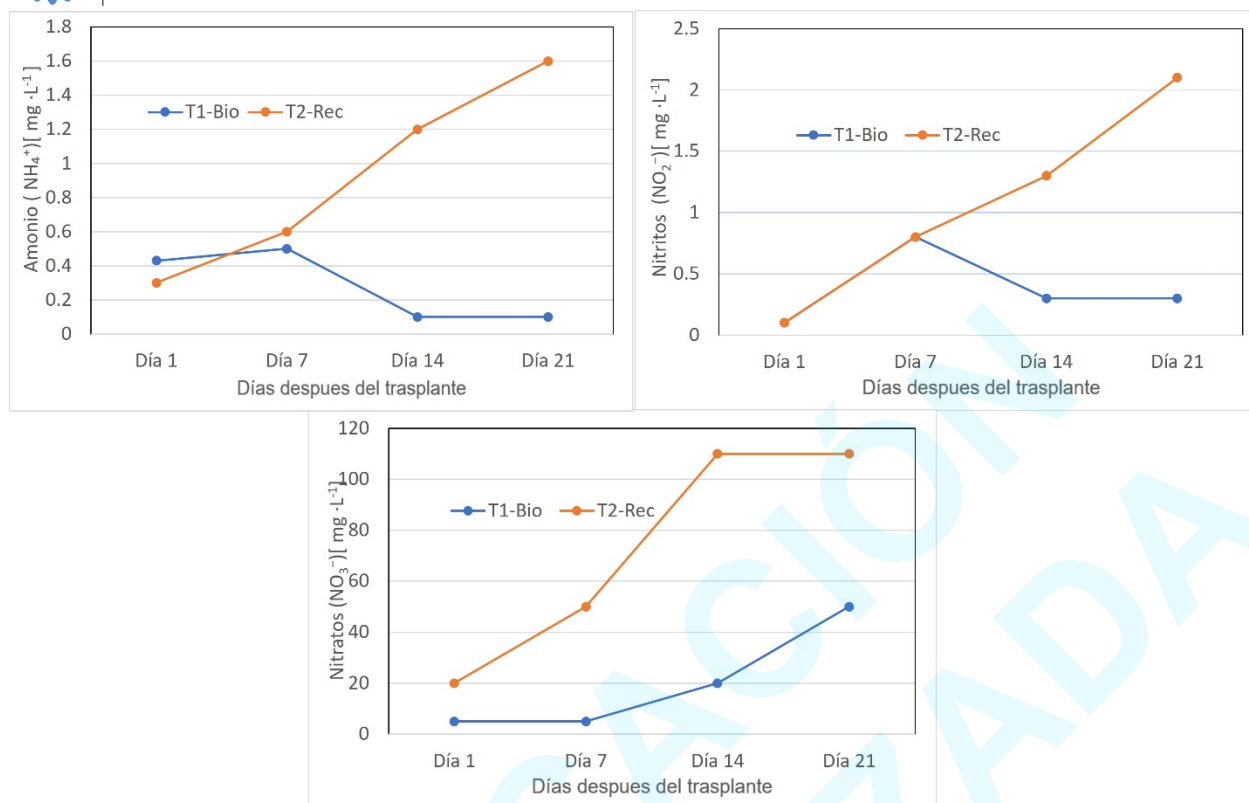


Figura 3. Concentraciones de amonio, nitritos y nitratos en la solución nutritiva durante el experimento. T1-Bio: sistema de acuaponía basado en tecnología *biofloc*; T2-Rec: sistema de acuaponía convencional con recirculación simple.

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 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 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para cultivos semintensivos y de 25 a 30 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 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 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 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 $10.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 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 promedio de $0.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 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.

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-Muñoz, 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
- 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>
- 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>
- 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. *Sucre*) 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>
- 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., & Roupael, 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). Nutritional 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/HORTSCI117582-23>

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>

PUBLICACIÓN
EN AVANZADA