

Evaluación del Sistema Acuapónico de Pequeña Escala para la Producción de Tilapia y Lechuga Evaluation of a Small-Scale Aquaponic System for Tilapia and Lettuce Production

Delia Jazmín Sánchez-Morales¹ , Juan Enrique Rubiños-Panta¹ ,
Guillermo Crespo-Pichardo¹ , Cándido Mendoza-Pérez¹ , Ma. de Lourdes Pérez-Ávila¹ ,
Maruja Peralta-Inga² y Cesar Enrique Rubiños-Hernandez³

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México; (D.J.S.M.), (J.E.R.P.), (G.C.P.), (C.M.P.), (M.L.P.A.).

[†] Autor para correspondencia: jerpkike@colpos.mx

² Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo-Perú. Facultad de agronomía. Calle Juan XXIII 391, Ciudad Universitaria. 14013 Lambayeque, Perú; (M.P.I).

³ Universidad Veracruzana. Lomas del Estadio s/n, Col. Zona Universitaria. 91000 Xalapa, Veracruz, México; (C.E.P.H).

RESUMEN

El sistema de producción acuapónico comprende la acuicultura e hidroponía, es decir, producción de especies acuáticas y plantas en soluciones acuosas y controladas, donde las plantas aprovechan nutrientes de la acuicultura, que con la fitodepuración del agua se reutiliza por los peces. El objetivo de este trabajo fue evaluar, los insumos (calidad del agua, alimento y energía), producción y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*) y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico para determinar la productividad del agua. El sistema tuvo cuatro tanques de cultivo acuícola, un sistema de filtración de agua y balsas para hidroponía. Como resultado los valores de calidad del agua fueron 7.4 mg L⁻¹ para oxígeno disuelto, 0.028 mg L⁻¹ nitrógeno amoniacal, 29 mg L⁻¹ nitrógeno de nitrato, 597 μS cm⁻¹ de conductividad eléctrica, 15 mg L⁻¹ de sólidos suspendidos, 349 mg L⁻¹ de sólidos disueltos totales; en la demanda bioquímica de oxígeno en los tanques de peces fue de 7.1 mg L⁻¹, en los filtros 8.9 mg L⁻¹ y en las balsas 8.5 mg L⁻¹ respectivamente. Se consumió 1398 kWh de energía total con un costo total de 699.00 pesos mexicanos. La pérdida de agua diaria en el sistema fue del 2.6%. En productividad del agua se obtuvo 10.3 kg m⁻³ en tilapia y 5 kg m⁻³ en lechuga. Se concluye que este sistema de producción puede ser una alternativa viable y eficiente a implementar para una producción sustentable de peces y cultivos agrícolas al mismo tiempo.

Palabras clave: bolsa flotante, consumo hídrico, criadero de peces.

SUMMARY

The aquaponic production system includes aquaculture and hydroponics, that is, production of aquatic species and plants in aqueous and controlled solutions, where the plants take advantage of nutrients from aquaculture, which with the phytopurification of the water are reused by the fish. The objective of this work was to evaluate the inputs (water quality, feed and energy), production and yield of lettuce (*Lactuca sativa*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in an aquaponic system to determine water productivity in 2018. The system had four aquaculture tanks, a water filtration system and ponds for hydroponics. As a result, the water quality values were 7.4 mg L⁻¹ for dissolved oxygen, 0.028 mg L⁻¹ ammoniacal nitrogen, 29 mg L⁻¹ nitrate nitrogen, 597 μS cm⁻¹ electrical conductivity, 15 mg L⁻¹ solids suspended, 349 mg L⁻¹ of total dissolved solids; The biochemical oxygen demand in the fish tanks was 7.1 mg L⁻¹, in the filters 8.9 mg L⁻¹ and in the ponds 8.5 mg L⁻¹ respectively. 1398 kWh



Cita recomendada:

Sánchez-Morales, D. J., Rubiños-Panta, J. E., Crespo-Pichardo, G., Mendoza-Pérez, C., Pérez-Ávila, M. L., Peralta-Inga, M., & Rubiños-Hernandez, C. E. (2024). Evaluación del Sistema Acuapónico de Pequeña Escala para la Producción de Tilapia y Lechuga. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-11. e2020. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.2020>

Recibido: 30 de junio de 2024.

Aceptado: 31 de julio de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Septiembre de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Fidel Núñez Ramírez



Copyright: © 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

of total energy was consumed with a total cost of 699.00 Mexican pesos. The daily water loss in the system was 2.6%. In water productivity, 10.3 kg m⁻³ was obtained in tilapia and 5 kg m⁻³ in lettuce. It is concluded that this production system can be a viable and efficient alternative to implement for sustainable production of fish and agricultural crops at the same time.

Index words: floating bag, water consumption, fish farm.

INTRODUCCIÓN

La acuaponía es un sistema integrado que combina la producción de cultivos hidropónicos y la acuicultura (Masser, Rakocy y Losordo, 2006; Muñoz-Gutiérrez 2012); en el que el agua y los nutrientes son conservados, recirculados y reutilizados (Liang y Chien, 2013). Además, sirve como un modelo sostenible de producción de alimentos saludables (Diver y Rinehart, 2006) y de alto valor nutritivo como carne de pescado y vegetales (Aguilera-Morales, Hernández, Mendieta y Herrera, 2012). Tiene la ventaja de reducir el consumo de agua (Love *et al.*, 2015); al conservarla para su uso continuo (Aguilera-Morales *et al.*, 2012);

El ahorro de agua en el sector agrícola que consume el 70% de agua dulce a nivel mundial, es necesario para gestionar su escasez y deterioro, por lo que se requiere de sistemas innovadores y sostenibles que mejoren el consumo del agua, la energía y producción de alimentos vegetales y animales rentables para la seguridad alimentaria. Uno de los sistemas que permite reducir el uso de agua e incrementar su productividad es la acuaponía, parte de la agro-agricultura integrada (AAI), la cual combina sistemas de producción para generar varios productos a la vez utilizando menos recursos, en este caso se maneja la cría de peces y el cultivo de plantas sin suelo, mediante un sistema multitrófico y de recirculación. El pez es alimentado y sus excretas fluyen en el agua hacia un filtro mecánico (que elimina las partículas sólidas), seguido por un biofiltro con bacterias que descomponen el amoníaco (producido por los peces y descomposición de la materia orgánica en nitrato), para ser aprovechados los nutrientes por las plantas, quienes terminan de filtrar el agua antes de ser retornada a los peces (Timmons, Ebeling y Piedrahita, 2009).

Para lograr una estabilidad en el sistema acuapónico y maximizar la producción, se deben controlar factores como luz solar, micro y macronutrientes, la calidad de agua, pH, oxígeno disuelto y niveles no tóxicos de amoníaco (Masser *et al.*, 2006). La productividad del agua y el rendimiento, la primera indica la relación de la producción total obtenida (kg) con respecto del volumen de agua total aplicada (m³) (Bessembinder, Leffelaar, Dhindwal y Ponsioen, 2005). El objetivo fue evaluar, los insumos (agua, alimento y energía), rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) bajo el sistema de acuaponía para determinar la productividad del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del Sistema Acuapónico

El sistema acuapónico de 8.05 m³ se instaló dentro de un invernadero de 91 m², en el Colegio Postgraduados, Campus Montecillo, en las coordenadas geográficas de 19° 27' 59.5" N, 98° 55' 01.5" O y 2250 m de altitud. Se instalaron cuatro contenedores para la producción acuícola con un volumen neto de 950 litros cada uno. En el sistema de filtrado se utilizaron cinco contenedores de plástico, para la clarificación del agua se utilizó un contenedor de 200 L y cuatro tambos de 100 litros de agua para tratamientos de segunda clarificación, mineralización, nitrificación y desgasificación. En el sistema hidropónico se instalaron cuatro balsas rectangulares de 3.6 m³, en una superficie de 18 m² por 30 cm de altura recubierta con geomembrana de polietileno de alta densidad (0.75 mm). La Figura 1 presenta el diseño y las dimensiones del sistema acuapónico instalado. El movimiento de agua en el sistema fue por gravedad, donde el nivel mayor se encontraba en los tanques de peces y el menor en un tanque de 50 L tipo sumidero, se instaló una bomba sumergible para que el agua tratada (por los filtros y las plantas) se regresara hacia los peces y generar la recirculación.

En la conducción de agua y aire se utilizaron tuberías hidráulicas de PVC de 38 mm y 25 mm, para la incorporación de oxígeno en el área de peces, plantas y biofiltros se utilizó manguera difusora de 13 mm de diámetro. La temperatura se midió diariamente con un termómetro digital.

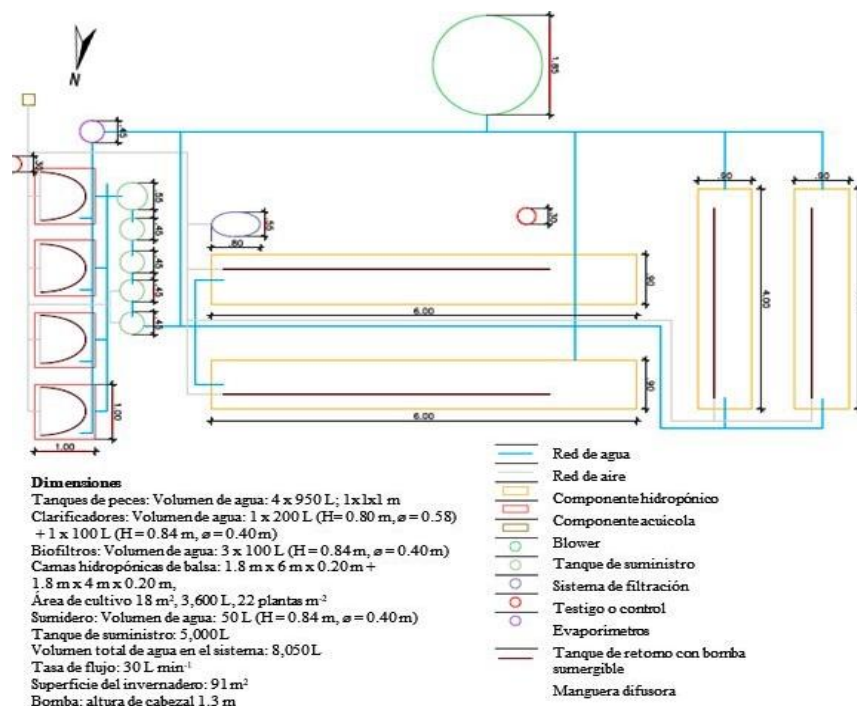


Figura 1. Diseño y dimensiones del sistema acuapónico instalado.
Figure 1. Design and dimensions of the installed aquaponic system.

Para regular la presión y la velocidad del agua se basó en el principio de Bernoulli, el cual menciona en puntos a lo largo de una línea horizontal de flujo, las regiones de mayor presión tienen una menor velocidad del fluido y las regiones de menor presión tienen una mayor velocidad del fluido.

Se inició con una población total de 530 tilapias de 6 meses de edad, con un peso promedio de 57 g y se distribuyeron homogéneamente en los cuatro tanques de peces. Los peces se alimentaron de manera manual dos veces por día con alimento balanceado para engorda (32% proteína y 6% grasa), la cantidad se suministró con base en el aumento de la masa de pescado que se calculó mensualmente. Se realizaron biometrías corporales en cada uno de los tanques con un muestreo del 10% del total de los peces, la cual se pesó en una balanza portátil y se dividió entre el número de peces de la muestra para calcular el peso unitario, y después se multiplicó por el número total de peces en el tanque para obtener la biomasa total, a cuyo resultado se le aplicó un porcentaje variable entre el 2 y 1% de acuerdo con la etapa de desarrollo del pez de menor a mayor que fue la ración diaria para ofrecer. El rendimiento de la producción se determinó con base en el factor de conversión alimenticia (FCA), dado por la relación del alimento total administrado entre la ganancia total de biomasa obtenida durante el experimento.

Manejo Hidropónico

El cultivo utilizado fue lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo sistema de balsa flotante de 18 m² con aireación. Se implementaron tres ciclos agrícolas, con una densidad de 11.10 plantas por metro cuadrado, en total 200 plantas por ciclo. La planta se sostuvo sobre placas de poliestireno expandido de densidad media de 2.54 cm de espesor, con perforaciones de 4.5 cm de diámetro a cada 30 cm con un diseño zig-zag.

Las plántulas se transfirieron al sistema acuapónico 12 días después de la siembra y con una balanza portátil se registró el peso total inicial. La cosecha se realizó a los 40 días y se reemplazó con nuevas plántulas. Para medir el rendimiento del cultivo, en cada ciclo se pesó una muestra recién cosechada de 40 brotes, se obtuvo la biomasa fresca promediando el peso por pieza y se multiplicó por 200 que era el total de plantas cultivadas por ciclo. Finalmente, se sumó el total producido en los tres ciclos para obtener la biomasa total producida y se dividió entre la superficie utilizada.

Calidad del Agua

Las mediciones de pH, temperatura y oxígeno disuelto (OD) del agua se tomaron semanalmente y la conductividad eléctrica una vez al mes por la mañana. Se utilizó un medidor multiparamétrico (Hanna 9828, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, E.U.). Las medidas se realizaron en todos los componentes del sistema, (cuatro tanques de peces, cinco tanques de filtración, cuatro camas y un sumidero). Cada mes se recolectaron muestras para determinar la concentración de compuestos de nitrógeno en amoníaco con un medidor de rango medio de $\text{NH}_3\text{-N}$ (Hanna 715, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, E.U.) con reactivos HANNA HI 715A-0 y HI 715B-0, y nitratos $\text{NO}_3\text{-N}$ con un fotómetro multiparámetro (Hanna C 214, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, E.U.) con reactivos HANNA HI 94766-50.

Los sólidos disueltos y suspendidos se determinaron bajo los procedimientos de la NMX-F-527-1992 (SCFI, 1992), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) con los procedimientos de la NMX-AA-028-SCFI-2001 (SE, 2001) con el método yodométrico y para los coliformes totales y fecales se tomó la metodología de la NMX-AA-042-SCFI-2015 (SE, 2015), todo esto se realizó en el laboratorio del Colegio de Postgraduados con la normativa anterior. Las muestras se tomaron a las 8:00 am en tres puntos del sistema, a la salida del drenaje de los tanques de peces, a la salida del sistema de filtración y a la salida de las camas hidropónicas y se llevaron inmediatamente al laboratorio para realizar el análisis de la calidad de agua.

Consumo de Energía

Los componentes mecánicos del sistema que requirieron suministro eléctrico fueron, una bomba de agua, un soplador de aire y un foco fluorescente, todos con demandas de energía variable y se ocuparon diariamente durante toda la investigación. Para la ventilación del invernadero se instalaron dos puertas opuestas para generar mayor circulación del viento. Se instalaron una planta eléctrica de gasolina como respaldo en caso de falla de la energía eléctrica de CFE. El consumo de electricidad diario (kWh día^{-1}), se estableció a partir de la potencia nominal de cada equipo (especificado por el fabricante) al multiplicar por la cantidad de horas que se utilizó al día. Los costos de energía se calcularon según las tarifas locales para electricidad de la Comisión Federal de Electricidad.

Productividad

El concepto de productividad del agua (PW) indica la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida (González-Robaina, López y Herrera, 2015). La producción agrícola se puede expresar en términos de peso de producto final, biomasa o dinero y su relación con la cantidad de agua utilizada en valores de evapotranspiración, agua total entregada para la producción o agua recibida como riego más lluvia, etc., (Bessembinder *et al.*, 2005). Se utilizó el consumo total de agua, energía y alimento con relación al peso total obtenido por sistemas de producción y se obtuvo el requerimiento por cada kilogramo de tilapia y de lechuga.

Manejo Hídrico del Sistema

El flujo de agua promedio fue de 30 L min^{-1} , en recirculación cada 2 horas, lo que permitía circular el volumen total de los tanques acuícolas 12 veces al día. Se tuvo pérdidas de agua por evaporación, evapotranspiración, drenado para la eliminación de lodos, recambio de agua, salpicaduras por los peces y limpieza. La reposición de agua se suministró a través de un tanque de almacenamiento de 5 m^3 con agua de pozo. Para los peces se instaló un microtúnel plastificado en el área de los tanques para mantener la temperatura y disminuir la pérdida de agua por evaporación.

La evaporación se midió en milímetros (mm) en tinas circulares bajo el principio de los tanques evaporímetros, donde se señaló con una marca indeleble el nivel de referencia inicial que debía mantener el agua. Diariamente a las 10:00 am, se midió con un vernier (marca Scala) la disminución del nivel por la evaporación para inmediatamente completar el agua en la tina al nivel de referencia original. Para la evapotranspiración se instaló una tina hidropónica de control o testigo de 70 litros con 10 plantas, con la aplicación de la misma agua, planta y oxigenación del experimento y se realizó la misma técnica de medición que en la evaporación.

La reposición de agua desde el tanque de almacenamiento al sistema se midió con una manguera transparente conectada a un costado del tanque, funcionando como tubo piezométrico, donde el nivel se elevaba hasta la altura equivalente a la presión del agua contenida y al reponer el agua se medía la variación de este nivel con una cinta métrica acondicionada sobre la manguera.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agua en el Sistema

Se tuvo una capacidad de almacenamiento total de 8050 L de agua, el cual se mantuvo estable diariamente. Al inicio, se presentaron problemas para mantener una carga hidráulica constante debido a un rápido flujo del agua recirculante, que provocó desbordamientos, por lo que se redujo la velocidad del fluido con el principio de Bernoulli. Para evitar taponamientos en la tubería, se le realizó limpieza con un sistema de filtrado cada quince días, entre los tanques de peces. El flujo de agua que recorre primero la tubería de drenaje de los peces, en este sentido se colocó una tee (accesorio de PVC) sobre la tubería, con un cambio de dirección de 90° el flujo de agua continuaba hacia los filtros, en el otro extremo paralelo de la tee se colocó una válvula, que cuando se abre permite una salida directa del agua, con mayor presión por la carga hidrostática en los tanques, que facilitó la limpieza de la tubería.

El periodo de evaluación de abril-julio, que correspondió a la época del año con mayor temperatura y tasa de evaporación de la zona según las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional de la estación 15170-Chapingo. Siendo la mejor temporada para producir tilapia sin necesidad de calentadores de agua, mientras que la reposición de agua es mayor en los meses más cálidos que en los más fríos. Se utilizó un volumen total de 25 753 L para reponer las pérdidas de agua. Esto significó una necesidad diaria promedio de 211 L y una tasa de recambio diaria promedio del 2.6% situándola dentro del rango de 0.5 a 10% determinado para acuaponía por Masser *et al.* (2006) y está por debajo del rango de 5 a 20% de los sistemas de recirculación acuícola (Timmons y Ebeling, 2013).

Las pérdidas de agua con respecto al volumen total utilizada durante el experimento representaron la evaporación (E) en 0.1%, evapotranspiración (ET) en 0.4%, intercambios de agua (recambios) en 1.3%, limpieza en 0.4% y otras pérdidas como derrames y salpicaduras no medidas (otros) en 0.5% (Figura 2). El total de las pérdidas medidas fue de 21.2 m³ y el volumen repuesto fue mayor al inicio por los derrames y fueron disminuyendo con el tiempo. La reposición de agua se realizó cada día o semanal, con base en la necesidad por las pérdidas del recurso. En el intercambio de agua se incluyeron las pérdidas por el drenado de lodos que arrojó en promedio 25 L diarios, de los cuales el 15% representó a los residuos sólidos de pescado.

La temperatura osciló en el rango de 13.7 y 46.1 °C con una media de 28.1 °C. El volumen total evaporado durante todo el periodo de evaluación fue de 1190 L con un promedio de 9.75 L diarios y el volumen total evapotranspirado fue de 3465 L con un promedio de 28.4 L diarios (Figura 3).

Calidad del Agua

Se mantuvieron valores medios viables para los tres organismos de acuerdo con los rangos de Somerville, Cohen, Pantanella, Stankus y Lovatelli (2014) en las variables de oxígeno disuelto (OD) de 7.4 mg L⁻¹ con un rango de 4.5 a 8.9 mg L⁻¹, temperatura de 22.1 °C con un rango de 20.4 a 22.7 °C y pH de 7.3 con un rango de 6.9 a 7.7 (Figura 4).

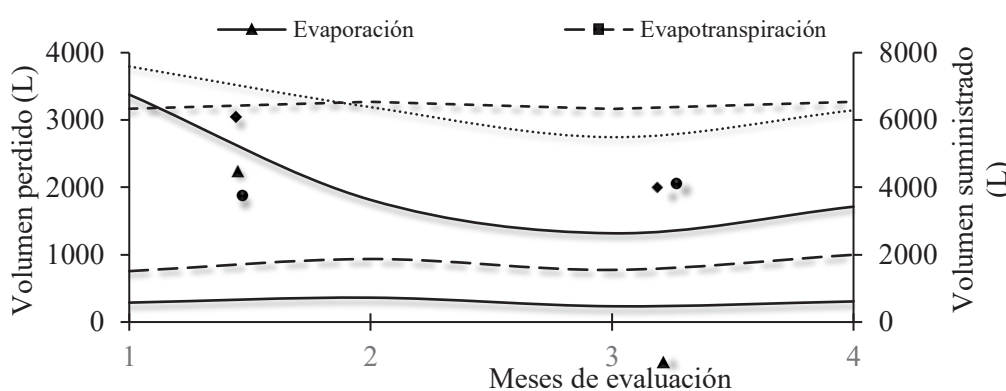


Figura 2. Relación del volumen reemplazado en el sistema y los volúmenes perdidos de agua.
Figure 2. Relationship of the volume replaced in the system and the volume of water lost.

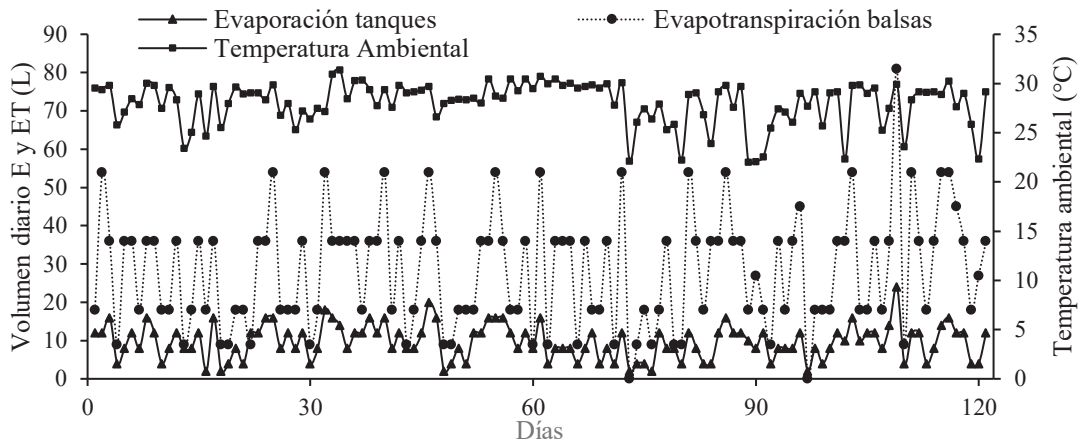


Figura 3. Temperatura ambiental, evaporación en tanques y evapotranspiración en balsas.
Figure 3. Ambient temperature, evaporation in tanks and evapotranspiration in ponds.

La concentración de nitrógeno amoniacal no ionizado $\text{NH}_3\text{-N}$ (amoníaco) fue de 0.028 mg L^{-1} con variaciones mensuales que no excedieron el recomendado por Timmons *et al.* (2009) de 0.05 mg L^{-1} ; este ion tiene un efecto directo sobre el crecimiento de los peces y provoca su muerte por toxicidad si la concentración es alta. La concentración de nitrato $\text{NO}_3\text{-N}$ fue de 29 mg L^{-1} . El nitrato permite el crecimiento de las lechugas, pero en exceso de este ion en las hojas, puede ser tóxico para la salud humana, incluso cancerígenos (Byrne, Maher, Hennerty, Mahon y Walshe, 2001). Se obtuvieron valores entre 70 a 300 mg L^{-1} de $\text{NH}_3\text{-N}$, la conductividad eléctrica (CE) que pasó de 597 a $1024 \mu\text{S cm}^{-1}$. Los compuestos de nitrógeno y la CE mostraron variaciones debido a que los organismos residentes en cada componente del sistema son distintos y modificaron las concentraciones en su respectivo espacio (Cuadro 1).

La cantidad promedio de Sólidos Suspendedos Totales (SST) fue de 15 mg L^{-1} y de Sólidos Disueltos Totales (SDT) de 349 mg L^{-1} , ambos dentro del rango establecido por Timmons *et al.* (2009) de 10 a 80 mg L^{-1} para SST y menor a 400 mg L^{-1} para SDT. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en los tanques de peces fue de 7.1 mg L^{-1} , en los filtros de 8.9 mg L^{-1} y en las balsas de 8.5 mg L^{-1} , todos por debajo de los 10 mg L^{-1} valores normales en la acuicultura según Love *et al.*, (2015).

Energía

El suministro de energía de los equipos para su funcionamiento fue la electricidad y su consumo estimado diario llegó a $11.46 \text{ kW h día}^{-1}$, donde el mayor consumidor fue el soplador de aire con 84% del total diario (Cuadro 2). El consumo eléctrico total estimado fue de 1398.1 kWh . A finales del 2017 en México se autorizaron las tarifas finales del suministro básico de estímulo acuícola, el precio se fijó en $\$0.50$ por kWh consumido, lo que resulta en un costo total de energía eléctrica del proyecto de $\$699.06$.

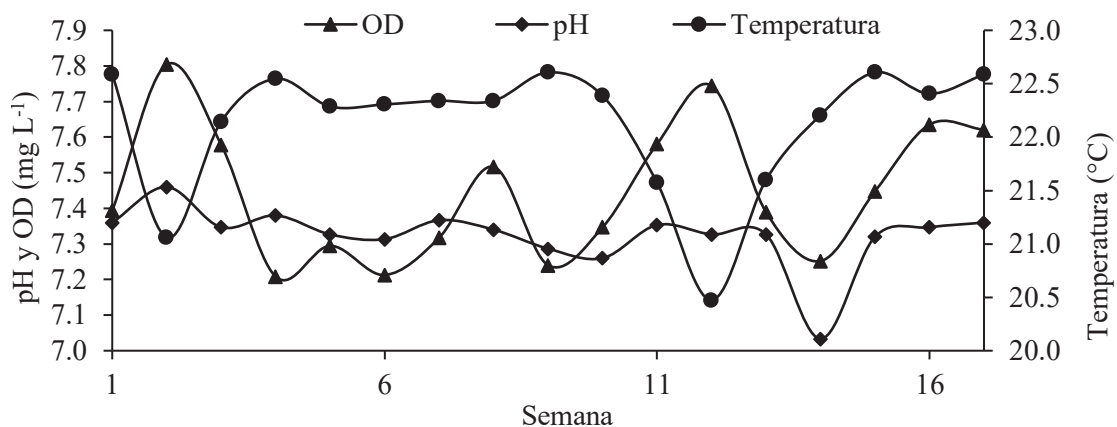


Figura 4. Promedio semanal de oxígeno disuelto (OD), temperatura y pH en el sistema.
Figure 4. Weekly average of dissolved oxygen (DO), temperature and pH in the system.

Cuadro 1. Concentración mensual de amoníaco, nitratos y conductividad eléctrica.
Table 1. Monthly concentration of ammonia, nitrates and electrical conductivity.

Mes	Amoníaco			Nitratos			CE		
	Tanques	Filtros	Balsas	Tanques	Filtros	Balsas	Tanques	Filtros	Balsas
	----- mg L ⁻¹ -----						----- μS cm ⁻¹ -----		
Abril	0.021	0.013	0.012	24.1	21.6	17.9	625	617	597
Mayo	0.030	0.024	0.022	30.0	22.4	16.9	715	697	689
Junio	0.039	0.024	0.023	30.6	29.7	28.6	924	915	909
Julio	0.048	0.043	0.035	50.3	45.5	30.2	1024	1015	1009

Producción de Tilapia

La tilapia ganó un total de 132.27 kg durante los 122 días del experimento (Cuadro 3) con un peso final promedio por organismo de 252.1 g, con una tasa de mortalidad registrada del 1 por ciento.

El factor de conversión alimenticia (FCA) fue de 1.32, mejor que el reportado por Massser *et al.* (2006) de 1.7 a 1.8 para tilapia criada en acuaponía, pero podría ser menor que 1.0 como lo reportado por Alcarraz-Quispe *et al.* (2018) que obtuvieron 0.75 FCA en acuicultura de recirculación productiva de lechuga (*Lactuca sativa*) con trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). El crecimiento diario fue de 1.07 g por día, el cual está debajo de 2.0 g reportado por Timmons *et al.* (2009) que podría deberse a la temperatura del agua y su correlación con la tasa de crecimiento del pescado, donde a menor temperatura menor tasa de crecimiento. La temperatura óptima de crianza es de 28 °C y en el sistema se mantuvo un promedio de 22.1 °C. Por otra parte, las temperaturas altas afectan a las plantas, lo que se requiere hacer un balance entre las necesidades del productor, al elegir el sector al que se le quiere dar preferencia (peces o cultivo).

La cantidad de alimento suministrado en todo el experimento fue de 174.73 kg, que en un inicio la ración diaria fue del 2% de la biomasa total. Pero se observó que los peces no consumían todo, que podría ser ocasionado por la baja temperatura ya que, al disminuir su actividad física y apetito, así que el porcentaje disminuyó hasta llegar al 1%. La biomasa total ganada creció linealmente mientras que el alimento suministrado tuvo ligeras variaciones (Figura 5).

Producción de Lechuga

Se obtuvo una producción total de 64.4 kg de lechuga con un promedio de 107.3 g por pieza, menor a lo obtenido en sistemas hidropónicos tradicionales. Se reportan un promedio anual de 144.6 g para ciclos completos de 30 días (Barbosa *et al.*, 2015) y menor de los 175.08 g obtenidos por Delaide *et al.* (2017) en ciclos de quince días para un sistema acuapónico de recirculación con lechuga de cabeza (*Lactuca sativa* var. Capitata) y tilapia (*Oreochromis niloticus*). Se atribuyen las altas cosechas con la calidad del agua y las condiciones ambientales apropiadas, en otros casos se han registrado pesos de hasta 550 g por planta en cosechas de 59 días de lechuga romana en hidroponía (Jacques-Hernández y Hernández, 2005).

Cuadro 2. Características de los componentes mecánicos del sistema y su demanda energética.
Table 2. Characteristics of the mechanical components of the system and their energy demand.

Equipo	Modelo y Marca	Consumo	Uso diario	Consumo diario
		W	h día ⁻¹	Wh día ⁻¹
Bomba de agua	4221, 6500L/H-4M, AquaSub.	65	24	1560
Soplador de aire	SA-RB30-510, 0.5 HP, Sino-Aqua	400	24	9600
Luz fluorescente	CFL mini-lynx espiral, Sylvana	25	12	300

Cuadro 3. Incremento de biomasa por mes y factor de conversión alimenticia (FCA).**Table 3. Increase in biomass per month and feed conversion factor (FCA).**

Mes	0	1	2	3	4	FCA
Biomasa acumulada (kg)	30.25	62.64	95.45	128.46	162.52	1.32
Incremento de masa fresca (%)		1.07	0.52	0.35	0.27	

El rendimiento de brotes de lechugas promedio fue de 1.2 kg m⁻², valor que estuvo debajo de lo reportado por Pantanella, Cardarelli, Colla, Rea y Marcucci (2012) quienes obtuvieron 2.71 kg m⁻² a los 21 días después del trasplante de lechuga romana cultivadas por la técnica de raíz flotante al emplear residuos de tilapia del Nilo con una densidad de peces de 8 kg m⁻². Lennard y Leonard (2006) reportaron 4.47 kg m⁻² de lechuga hoja de roble con la técnica raíz flotante empleando residuos de bacalao (*Gadus morhua*). Barbosa *et al.* (2015) indicaron rendimientos mensuales de 3.4 kg m⁻² durante todo el año; mientras que Delaide *et al.* (2017) reportaron 2.4 kg m⁻² con una densidad de 14 plantas por metro cuadrado.

En la primera y segunda cosecha se registró un mayor rendimiento del cultivo en comparación con el tercer ciclo (Cuadro 4), reflejándose en las biometrías y en el color amarillento de algunas plantas, lo que podría relacionarse con la disminución de nutrientes y la aparición de plagas de pulgón (*Aphididae*) al inicio del tercer ciclo, que se controló sin uso de plaguicidas.

Delaide *et al.* (2017) observaron que, del 50 al 88% de los nutrientes en el agua de acuaponía se pierden bajo una tasa de intercambio diario del 3.6%, debido en mayor proporción a las pérdidas por recambio de agua. Algunos nutrientes podrían haber quedado atrapados en otra parte del sistema, como en las paredes de los tanques, el fondo de las balsas, en los medios de filtración, etc. Aquí se perdió al día un promedio de 25 L con 15% de sólidos.

Productividad del Agua

Se consumió 194.7 L, 10.6 kWh y 1.32 kg de alimento por cada kilogramo de pescado obtenido y se produjo 0.5 kg de lechuga, por lo tanto, se compartieron estos consumos reduciéndose a la mitad para cada actividad productiva. Esto significa que para producir 1 kg de tilapia se requiere 97.35 L y proporcionalmente para 1 kg de lechuga se requiere 199.93 L de agua. El consumo de energía para producir 1 kg de biomasa fue de 5.29 kWh en tilapia y de 10.85 kWh en lechuga con costos de \$2.64 y \$5.43 respectivamente. El consumo de energía fue muy bajo debido al poco equipo utilizado ya que para la producción de 1 kg de plantas y peces se consumieron 84.5 y 96.2 kWh según lo reportado por Delaide *et al.* (2017).

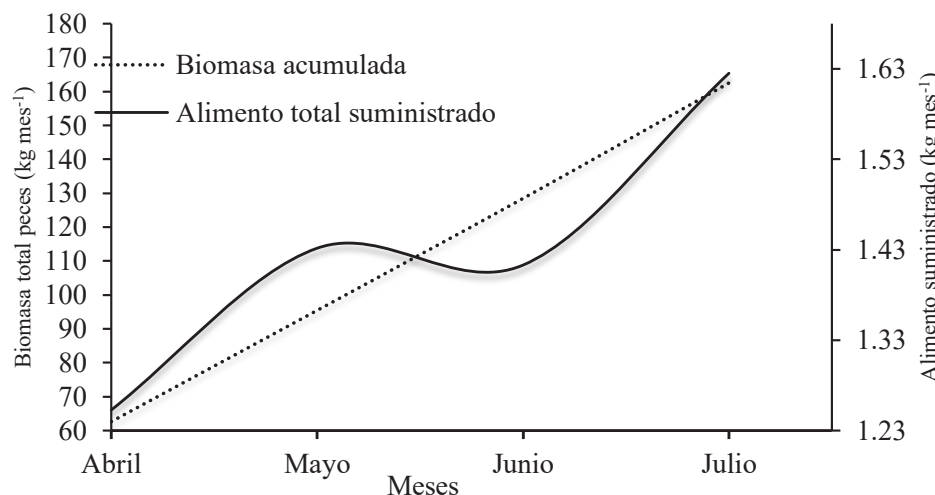


Figura 5. Biomasa y alimento suministrado mensualmente.
Figure 5. Biomass and food supplied monthly.

Cuadro 4. Biometrías de plantas y rendimientos por ciclo.
Table 4. Plant biometrics and yields per cycle.

Biomasa	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Promedio	Total
Peso inicial por planta (g)	3.89	2.96	3.92	3.6	
Peso inicial total (kg)	0.78	0.59	0.78		2.2
Peso final por planta (g)	134.86	123.43	74.50	110.9	
Peso final total (kg)	26.97	24.69	14.9		66.6
Rendimiento (kg m ²)	1.46	1.34	0.78	1.2	

Por otro lado, Love *et al.* (2015) reportaron que el consumo fue 56 y 159 kWh respectivamente por el uso de calentadores y ventiladores. Para producir 1 kg de tilapia y lechuga en este experimento se suministraron 0.67 y 1.36 kg de alimento respectivamente (Cuadro 5). La eficiencia para convertir alimento en biomasa en la tilapia fue de 0.75 kg de peso fresco por cada kilogramo de alimento suministrado.

Con relación a la entrada diaria de alimento, la tasa de intercambio de agua fue de 147.38 L kg⁻¹ de alimento día⁻¹, que se encuentra en el rango de 100-1000 L kg⁻¹ de alimento sistema⁻¹ de recirculación de acuicultura convencionales (Martins *et al.*, 2010). Estos resultados confirman que la acuaponía es un método eficiente en el uso de agua para la producción de plantas y peces. En las plantas se obtuvo un consumo de agua por kg de lechuga de 0.2 m³ mayor al 0.1 m³ obtenido por Love *et al.* (2015) pero menor al reportado por Delaide *et al.* (2017) de 0.24 metros cúbicos.

El consumo de agua con respecto a cada unidad de peso en tilapia producida fue de 0.1 m³, lo cual resulta aceptable por la densidad de peces manejada de 28.7 kg m⁻³. Love *et al.* (2015) y Delaide *et al.* (2017) obtuvieron consumos de 0.292 y 0.278 m³ respectivamente para sistemas de pequeña escala. Por otro lado, Tokunaga, Tamaru, Ako y Leung (2015) mantuvieron un consumo mínimo de 0.0027 m³ de agua, obteniendo la mejor productividad hídrica con su sistema intensivo. Individualmente se consumieron 24.3 L por cada pescado de aproximadamente 252.1 gramos.

Se consumieron 21.5 L por cada planta de lechuga de 107.3 g. En ese sentido, Jacques-Hernández y Hernández (2005) reportaron un consumo de 13.8 L de agua por cada pieza de lechuga romana, con una densidad de 5.9 plantas m² con peso de cosecha de 500 g, y utilizando un sistema de producción hidropónico. Por otro lado, el consumo de agua por planta de lechuga en riego rodado y por goteo es de 360 y 252 L lo que significa un enorme ahorro del recurso hídrico en acuaponía (Díaz-Espino, Arévalo, García y Bujanos, 2011). En términos de productividad final, se obtuvo 10.3 kg de tilapia y 5.0 kg de lechuga por metros cúbicos.

Cuadro 5. Requerimiento de agua, suministro de alimento y energía para producir tilapia.
Table 5. Requirement of water, feed supply and energy to produce tilapia.

Variable	Unidad	Consumo para 1 kg de Tilapia	Consumo para 1 kg de Lechuga
Agua	m ³	0.1	0.2
Alimento suministrado	kg	0.67	1.36
Energía	kWh	5.29	10.85
Costo de energía	\$	2.64	5.43

CONCLUSIONES

Se concluye que el sistema de producción de pequeña escala es eficiente en términos de consumo de agua diario, lo cual representa una alternativa viable a implementar para la producción sustentable de peces y cultivos agrícola al mismo tiempo.

Las condiciones de calidad del agua como temperatura, pH y oxígeno disuelto se mantuvieron dentro de los rangos óptimos para la producción acuícola.

Se registró una baja presencia de nitratos lo que afectó directamente en el desarrollo de la planta, por lo que se requiere buscar alternativas para completar la demanda de N a los cultivos.

Se recomienda incrementar la densidad de plantación bajo este sistema de producción para aumentar el rendimiento de cultivo de lechuga.

La ración alimenticia de los peces fue óptima con base en las mediciones biométricas, dando un buen factor de conversión alimenticia y buen crecimiento de los peces según comparaciones con otros sistemas ya implementados.

La productividad del agua mejoró comparada con otros sistemas de producción, debido al adecuado manejo del sistema y bajo desperdicio hídrico, lo que hace de la acuaponía una alternativa sustentable.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el presente estudio están disponibles del autor correspondiente previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Se deben divulgar todas las fuentes de financiación de la investigación informada.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: D.J.S.M. y J.E.R.P. Metodología: D.J.S.M. y J.E.R.P. Software: D.J.S.M. Validación: D.J.S.M., J.E.R.P. y G.C.P. Análisis formal: D.J.S.M. y J.E.R.P. Investigación: D.J.S.M. Recursos: J.E.R.P. Curación de datos: C.M.P. Escritura: Preparación del borrador original: D.J.S.M. Escritura: Revisión y edición: D.J.S.M., J.E.R.P., C.M.P. y M.L.P.A. Visualización: M.P.I. Supervisión: J.E.R.P. Administración del proyecto: J.E.R.P. Adquisición de fondos: J.E.R.P.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- 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), 1-10. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1145>
- Aguilera-Morales, M. E., Hernández-Sánchez, F., Mendieta-Sánchez, E., & Herrera-Fuentes, C. (2012). Producción integral sustentable de alimentos. *Ra-Ximhai*, 8(3), 71-74.

- Barbosa, G., Almeida-Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., ... & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879-6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
- Bessembinder, J. E., Leffelaar, P. A., Dhindwal, A. S., & Ponsioen, T. C. (2005). Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agricultural Water Management*, 73(2), 113-130. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.10.004>
- Byrne, C., Maher, M. J., Hennerty, M. J., Mahon, M. J., & Walshe, P. A. (2001). Reducing the nitrogen content of protected lettuce crops. *Irish Journal of Agricultural Food Research*, 39(3), 1-19.
- Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeyurt, H., & Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFf Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78 (1), 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>.
- Díaz-Espino L. F., Arévalo-Valenzuela, A., García-Leaños, L., & Bujanos-Muñiz, R. (2011). *Fertirrigación en el cultivo de lechuga en Guanajuato*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Diver, S., & Rinehart, L. (2006). *Aquaponics-Integration of hydroponics with aquaculture*. USA: ATTRA.
- González-Robaina, F., López-Seijas, T., & Herrera-Puebla, J. (2015). Indicadores de productividad del agua por cultivos y técnicas de riego en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(4), 57-63.
- Jacques-Hernández, C., & Hernández, J. L. (2005). Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*, 3(1), 11-17.
- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14(6), 539-550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- Liang, J. Y., & Chien, Y. H. (2013). Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 693-700. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.03.029>
- Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023>
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C., Heinsbroek, L. T., Schneider, O., Blancheton, J. P., ... & Verreth, J. A. J. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- Masser, M. P., Rakocy, J. E., & Losordo, T. M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. *Southern Regional Aquaculture Center (SRAC)*, 454, 2-17.
- Muñoz-Gutiérrez, M. E. (2012). Sistemas de recirculación acuapónicos. *Informador Técnico*, 76, 123-129. <https://doi.org/10.23850/22565035.36>.
- Pantanello, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. In *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010)*. *International Symposium on 927* (pp. 887-893). Lisbon, Portugal: ISHS Acta Horticulturae. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>
- SCFI (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial). (1992). Norma Oficial Mexicana NMX-F-527-1992. Alimentos - determinación de sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos en suspensión en agua. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- SE (Secretaría de Economía). (2001). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (dbo5) y residuales tratadas - método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- SE (Secretaría de Economía). (2015). NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua - enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli - método del número más probable en tubos múltiples. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanello, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN: 978-92-5-108532-5
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., & Piedrahita, R. H. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Ithaca, USA: Cayuga Aqua Ventures. ISBN: 9780971264632
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2013). *Recirculating Aquaculture*, 3rd ed. Ithaca, NY, USA: Ithaca Publishing Company LLC.
- Tokunaga, K., Tamaru, C., Ako, H., & Leung, P. (2015). Economics of Small-scale Commercial Aquaponics in Hawaii. *Journal of the World Aquaculture Society* 46(1), 20-32. <https://doi.org/10.1111/jwas.12173>