

Diseño de un sistema acuapónico de baja intensidad para la producción de *Oreochromis niloticus* y *Nasturtium officinale* para ambientes urbanos



Colaboración

Martha Elena Rodríguez Hernández; Gustavo Martínez Castellanos; María Cristina López Méndez; María Guadalupe López Landero; Jessica Yasmin García González, Tecnológico Nacional de México / Campus Misantla

Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2023

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2023

RESUMEN: La acuaponía ha impactado positivamente en la producción de alimentos proteicos de consumo humano y por su mínimo uso de recursos naturales. El presente estudio se centró en realizar el diseño, suministro, habilitación y montaje de un sistema acuapónico por inundación, para la producción de Tilapia y berro de agua (*N. officinale*) en la ciudad de Misantla, Veracruz. El sistema construido cuenta con cuatro elementos: un reservorio de 1,700 L, un sistema mecánico de sedimentación (200 L), una cama de inundación con una capacidad de 360 L y un sistema de recirculación. Los resultados demuestran que en el sistema de baja intensidad se pueden alcanzar tallas de peces de 479.54 + 40.5 g en un periodo de ocho meses con un bajo consumo de energía, agua y un manejo mínimo del sistema. Por otra parte, la planta en estudio fue capaz de adaptarse a las condiciones acuapónicas. Los parámetros de la calidad del agua se mantuvieron dentro de sus respectivas especificaciones. Por lo tanto, se concluye que el sistema es sustentable al no ser invasivo con el medio ambiente produciendo de manera inocua peces y plantas apoyando la economía familiar.

PALABRAS CLAVE: Sistema acuapónico, *Oreochromis niloticus* y *Nasturtium officinale*.

ABSTRACT: Aquaponics has positively impacted the production of protein foods for human consumption and the decrease in the use of natural resources. This project focused on the design and assembly of a flood aquaponic system for the production of Tilapia and watercress (*N. officinale*) in the city of Misantla, Veracruz. The built system has four elements: a 1,700 reservoir, a mechanical sedimentation system (200 L), a flooding bed with a capacity of 360 L and a recirculation system. The results show that fish sizes of 479.54 + 40.5 g can be achieved in the low intensity system over a period of eight months with low energy and water consumption and minimal system management. On the other hand, the plant under study was able to adapt to aquaponic conditions. The water quality parameters showed that there were no significant changes that affected the crops. Therefore, it is concluded that the designed system is sustainable as it is not invasive with the environment, safely producing plants and animals, supporting the family economy.

KEYWORDS: Aquaponic System *Oreochromis niloticus* y *Nasturtium officinale*.

INTRODUCCIÓN

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas la población mundial aumentará 2,000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de 7,982,686,753 millones en la actualidad a 9,982,686,753 millones en el 2050 [1]. La OMS reporta 828 millones de personas que han padecido hambre en 2021 y 2,200 millones de personas sin acceso a agua potable de manera segura en 2022. Por lo tanto, es necesario la im-

plementación de procesos sustentables que contribuyan a generar alimentos naturales, seguros y ricos en nutrientes. Los sistemas acuapónicos se enfocan a la producción de peces y plantas [2], con un menor impacto ambiental negativo de sus desechos que las productoras acuícolas tradicionales. Estos sistemas constituyen una integración de la acuicultura y la hidroponía [2], [3], mismas que se unen en un único sistema de recirculación aprovechando los desechos metabólicos generados por los peces y los restos de alimentos, convirtiéndose en nutrientes para las plantas, limpiando en este proceso el agua para incorporarla al reservorio de los peces [4].

La mayoría de los sistemas productivos están enfocados a producir a escalas medianas o grandes y los sistemas pequeños se realizan de manera artesanal. La acuaponía se ha convertido en una actividad productiva con un crecimiento ascendente, caracterizándose por ser flexible para el cultivo de diversas especies [5]. La mojarra Tilapia (*O. niloticus*) es la segunda especie acuática más cultivada debido a que cuenta con una alta adaptabilidad a diferentes ambientes, alimentos y calidades de agua, aunado a su resistencia a enfermedades y a su fácil producción [6].

Además de la Tilapia, en el sistema acuapónico se pueden cultivar diversas especies acuáticas combinadas con diversas especies de vegetales tanto comestibles como plantas ornamentales, según el fin que se tenga. El berro de agua (*N. officinale*) es una planta acuática rastrera o flotante, tolerante al frío [8], que es capaz de adaptarse a un amplio rango de hábitats y aclimatarse a espectros amplios de luz, características que le han brindado una amplia posibilidad de distribución en el ambiente o incluso en sistemas acuapónicos.

En general, tanto peces como plantas pueden adaptarse para cultivarse en sistemas acuapónicos a pequeña escala, que tienen como propósito la producción de alimento para uso doméstico en ambientes rurales o urbanos. Generalmente los sistemas a pequeña escala cuentan con tanques de peces de cerca de 1000 L y un espacio para cultivo de 3 m² en promedio, apropiados para la producción doméstica suficiente para una familia pequeña [9]. Las instalaciones con dimensiones entre 50 – 200 m² se clasifican como pequeñas, entre 5 – 50 m² muy pequeñas y < 5 m² microsistemas [10].

Con base a lo anterior, el objetivo del estudio fue diseñar y construir un sistema funcional a baja escala para la producción de Tilapia y berro de agua (*Nasturtium officinale*), con una alta resistencia a cambios de temperatura, iluminación y temporadas de escasez de agua, amigable en el mantenimiento de: las especies, los reservorios y la operación, ideal para proveer comestibles de alta calidad en ciclos de 8 meses para pequeñas familias.

MATERIAL Y MÉTODOS

Metodología

El presente estudio se llevó a la práctica desde noviembre 2022 hasta junio 2023. Una vez analizados los factores determinantes en el diseño, se implementó una metodología experimental, monitoreando y evaluando sistemáticamente las variables físicas y químicas que impactan en el crecimiento y engorda de la Tilapia y la adaptación del berro, tomando medidas correctivas y/o preventivas al perder la especificación de la temperatura, oxigenación, nitritos, nitratos, pH o alguna otra variable crítica.

Se realizó el diseño y montaje del sistema acuapónico en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Los elementos y configuración del sistema se muestran en la Figura 1.

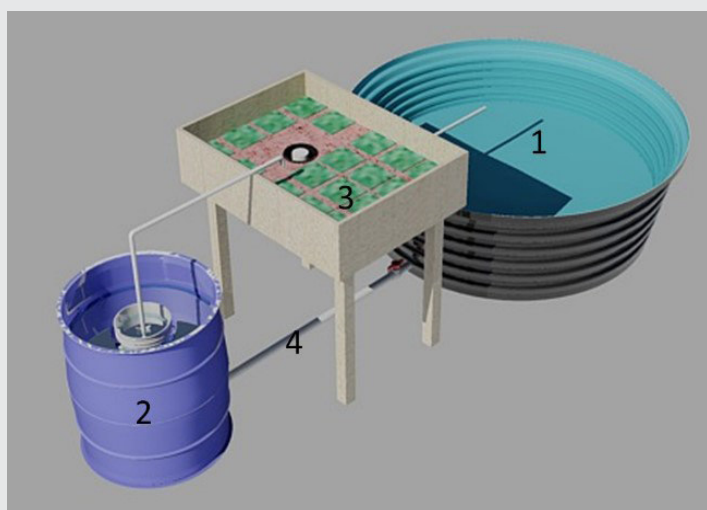


Figura 1. Diseño del sistema acuapónico para la producción de *O. niloticus* y *N. officinale* para ambientes urbanos.

Fuente: Elaboración propia.

Las partes y características del sistema se detallan a continuación:

1. Reservorio de peces: Consistió en un bebedero Rotoplas con una capacidad de 1,700 L, con una profundidad de 0.78 m y un diámetro de 2.1 m; el reservorio contaba con dos cabezas de poder de la marca Aqua Flow con capacidad de 750 L/h de 6.5 watts cuya función era mantener el agua en movimiento constante para ayudar a oxigenar el reservorio.

2. Sistema de filtración mecánica: Fue construido con la adaptación de un contenedor de plástico de 0.59 m de diámetro y una altura de 0.88 m con una capacidad de 200 L, integrado con un reservorio interno de 20 L para generar la separación de las partículas sedimentables y evitar su paso a la cama de inundación.

3. Cama de inundación (unidad hidropónica): La cama de las plantas estaba en un cajón de madera previamente barnizado de 1.30 m de ancho x 0.90 m de largo y 0.30 m de altura, el cual fue recubierto con material plástico como aislante de agua y humedad. La cama de inundación fue llenada con grava volcánica (Tezontle) previamente seleccionada por porosidad y tamaño entre 1 y 3

cm. La grava fue parte esencial de este sistema, ya que le da la capacidad de actuar como superficie de fijación de bacterias nitrificantes, dándole la funcionalidad de filtro biológico para que el amoníaco generado por los peces y los desechos se metabolizaran a nitritos y nitratos, además de que también retenía y degradaba partículas que no se lograban retener en el filtro mecánico. La cama de inundación se encontraba a una altura de 90 cm para que, por gravedad el agua regresara al tanque de los peces. La unidad hidropónica se construyó con 3 propósitos diferentes: a) Sistema de filtración biológica para metabolizar el nitrógeno amoniacal mediante oxidación aerobia/anóxica; b) sustrato fijo para el crecimiento de las plantas y; c) filtro físico para retención de partículas sedimentables.

4. Sistema de recirculación: El sistema estaba integrado por tubería hidráulica de 1 ½ pulgadas de diámetro conectando el reservorio de peces y el filtro mecánico y; tubería de ½ pulgadas de diámetro que va del filtro mecánico a la cama de inundación y de la cama de inundación al reservorio de los peces, lo anterior se puede apreciar en la Figura 1. En el sistema de filtración mecánica se encontraba instalada una bomba Resun de 800 L/h para recircular el agua clarificada a la cama de inundación, misma que contaba con un sistema de sifoneo tipo campana el cual permitía el aumento del agua hasta una altura de 15 cm que posteriormente por medio del sistema de vacío creado en el sifón, permitiera el desfogue del agua hacia el reservorio de los peces en un tiempo aproximado de 7.5 min, permitiendo su oxigenación.

Siembra de *O. niloticus* en el sistema

En el presente estudio se utilizaron alevines de tilapia con un peso inicial de 17.9 + 1.5 g y una longitud de 4.1 cm en promedio. Los peces fueron adquiridos en el mes de noviembre del 2022 en la Granja Acuícola Marina, ubicada en el Km. 2 Carr. Carrizal en el Municipio de Juchique de Ferrer. Se realizó el cultivo de 12 org/m³ de tilapia (*O. niloticus*).

Alimentación de *O. niloticus*

Se suministró alimento Nogafish de la marca NOGAL con un 36% de proteína, grasas min 6.0%, fibra cruda max 5.0%, cenizas max 8%, humedad max 12%, y ELN 33%, se les proporcionó alimentación tres veces al día (9:00 am, 12:30 pm y 16:00 pm) hasta aparente saciedad según lo reportado por [11], durante una observación de 10 minutos.

Crecimiento de *O. niloticus* en el sistema

Las variables de crecimiento son indicadores del éxito en el proceso de producción. Se registraron mediciones mensuales del crecimiento de los peces durante todo el periodo del experimento [12]. Se consideraron variables tales como: peso corporal, longitud, y supervivencia. El peso corporal se calculó mensualmente, para ello se tomó una muestra de 15 peces, se utilizó una báscula de precisión Nbe-cf2 Noval en los primeros meses del experimento, posteriormente una báscula comercial digital Rhino BAR-8 40kg 110V. Por otra parte, la longitud

de los peces fue medida en cm para lo que se utilizó un Vernier digital de la marca Keatronic, se alineó la punta de la boca del pez a la mordaza superior del Vernier y el inicio de la aleta caudal a la mordaza inferior, anotando la dimensión que marcaba el instrumento de medición.

Crecimiento de berro de agua *Nasturtium officinale*

El berro es una planta común en el municipio de Misantla conocida por su alto contenido en vitamina A y C, su baja demanda en la absorción de nutrientes la convirtió en la candidata perfecta para el cultivo [13], la siembra se realizó con el propósito de estudiar su adaptación en el sistema acuapónico con cama de inundación. Además de ser una planta rica en nutrientes consumida por los humanos en ensalada, comidas, es utilizada también como planta medicinal [14].

Para el crecimiento y cultivo de la verdura estudiada en el sistema acuapónico, primeramente, se realizó la adquisición de un rollo de berros mismo que fue comprado a los agricultores de la región de Misantla, se buscó y seleccionó aquel que presentara plantas con mayor cantidad de raíces de tal manera que estas permitieran absorber los nutrientes necesarios cuando fueran colocadas dentro de la cama de inundación. También fueron seleccionados los especímenes con el tallo más grueso y sano (sin presencia de pudriciones o daños). Una vez seleccionadas las plantas, se cortaron esquejes de 10 cm retirando todas las hojas con un bisturí estéril con el fin de evitar la contaminación y pudrición de las plantas. A los esquejes se les aplicó canela en polvo en los extremos del tallo y en las partes donde se le retiraron las hojas, con la finalidad de generar cicatrización en cada uno de los cortes, además de ayudar a proteger a los esquejes evitando daños por presencia de hongos. Finalmente fueron colocadas dentro de la cama de inundación como se puede observar en la Figura 2.



Figura 2. Siembra de esquejes de *Nasturtium Officinale* en la cama de inundación de un sistema acuapónico.

Fuente: Elaboración propia.

Los experimentos se realizaron a partir del mes de marzo y se enfocó en la adaptación de las plantas al

sistema, el cultivo fue hecho por esqueje mismos que fueron tomados de plantas maduras.

Parámetros de calidad del agua

La medición de los parámetros del agua son parte fundamental de la evaluación y control de todo sistema ya que muestran su comportamiento y permiten el control y la toma de decisiones sobre el mismo. Los parámetros analizados fueron: temperatura, pH, conductividad eléctrica y total de sólidos disueltos recomendados por [15], [16] y evaluados mediante un medidor multiparamétrico digital. Así mismo también se evaluó amoníaco, nitritos y nitratos para ello se utilizó un kit colorimétrico Api Fresh Water.

Manejo y mantenimiento del sistema

El sistema de recirculación se mantuvo encendido durante todo el experimento. Se realizaron drenados o limpiezas semanales de 20 L del fondo del tanque de sedimentación mecánica y se repuso quincenalmente aproximadamente el 10 % del volumen total del agua del sistema que se perdía por evaporación o lavado. A pesar de que, en los primeros meses del experimento la limpieza del filtro mecánico fue ocasional y dependía del material acumulado, se decidió hacer limpiezas semanales a partir del mes de marzo, cuando las temperaturas de la zona se elevaron y los animales en experimentación comenzaron a alimentarse mejor y por consecuencia a producir mayor contenido de residuos en el sistema.

RESULTADOS

El prototipo construido mantuvo un funcionamiento continuo durante los 8 meses de experimentación de manera abierta como se observa en la Figura 3.

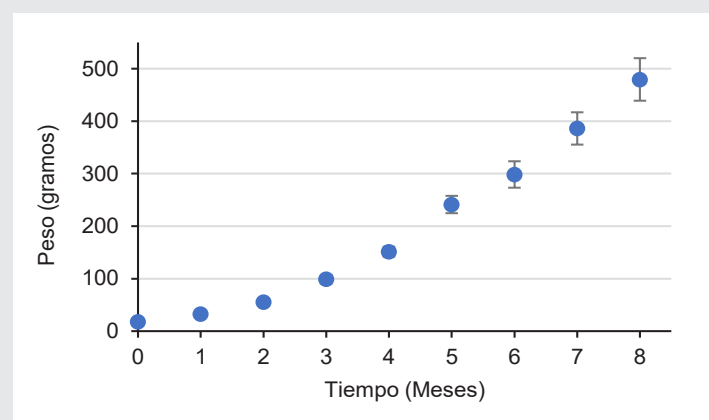


Figura 3. Sistema acuapónico físico en las instalaciones del ITS Misantla.

Fuente: Elaboración propia.

En los primeros meses (noviembre – febrero del 2022) se presentaron temperaturas bajas que rondaban entre los 10 a 18°C y de marzo a junio del 2023 temperaturas entre 20 - 28°C, estas temperaturas no satisfacen ple-

namente la especificación de 22 a 32°C recomendadas por expertos, por lo que las tilapias no presentaron una ganancia de peso óptima, como se aprecia en la Gráfica 1. También se puede observar el comportamiento de la ganancia de peso durante los 8 meses del experimento.



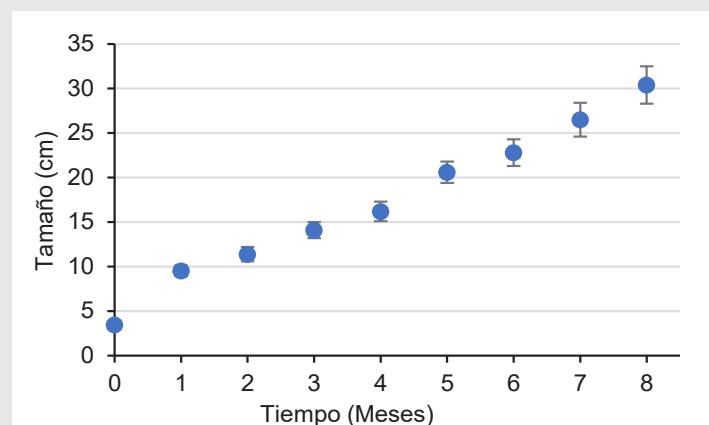
Gráfica 1. Ganancia de peso en un periodo de 8 meses.

Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse que a pesar de que se inició con peces con pesos de 17.9 + 1.5 g con 1 mes y medio de edad, la talla comercial alcanzada fue hasta el 8vo mes de experimentación (479.54 + 40.5 g), cuando algunos autores [17], [18] han reportado tallas comerciales de 450 g a los 6 meses de cultivo, con lo que se refuerza el efecto que tiene la temperatura en el desarrollo de la Tilapia.

En el sistema no hubo mortalidad debido a la baja densidad poblacional experimentada. Estos comportamientos sobre la disminución del crecimiento e incluso mortalidad de los peces en los sistemas con respecto a bajas temperaturas han sido reportado previamente [19].

Puede observarse en la Gráfica 2 que la ganancia de tamaño en los meses “fríos” fue lenta y en los meses cálidos presentaron mayor crecimiento, lo cual es consistente con los datos reportados por [20].



Gráfica 2. Comportamiento del crecimiento de los peces en el prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

Al inicio y durante un periodo de 4 meses (noviembre – febrero) del experimento y con la finalidad de adaptar el biofiltro de la cama de inundación y retirar nitratos del sistema fueron cultivadas plantas ornamentales de la variedad *Sansevieria trifasciata* que son más resistentes al frío y no son muy exigentes en la absorción de nutrientes, por lo que se mantuvo la calidad del agua.

Una vez que las temperaturas aumentaron a partir del mes de marzo, se iniciaron los experimentos con la siembra de esquejes de berro, los primeros días presentaron un aspecto fresco (Figura 4), al séptimo día se notaron daños en la parte inferior de los esquejes y el tamaño del tallo fue disminuyendo con el tiempo. A las 5 semanas de permanecer las plantas en la cama de inundación se habían dañado y perdido todos los tallos de las plantas sembradas, siendo sustituidos por brotes sanos y abundantes mostrando una adaptación adecuada dentro del sistema (Figura 5).



Figura 4. Adaptación y desarrollo del berro en el sistema. Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el crecimiento de la planta en el sistema acuapónico se consideró únicamente 2 variantes, las cuales fueron el tamaño del tallo y el número de hojas presentes en cada uno de los esquejes.

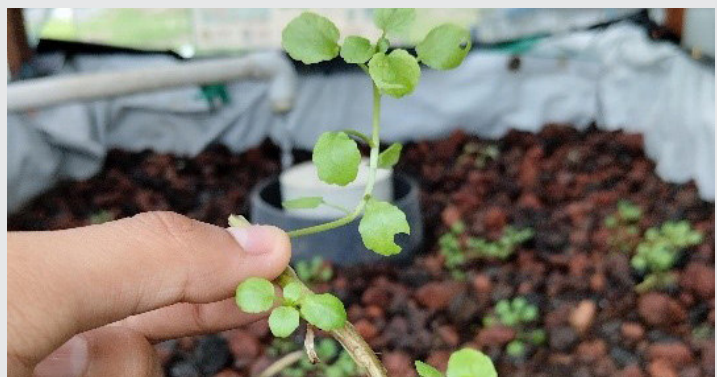


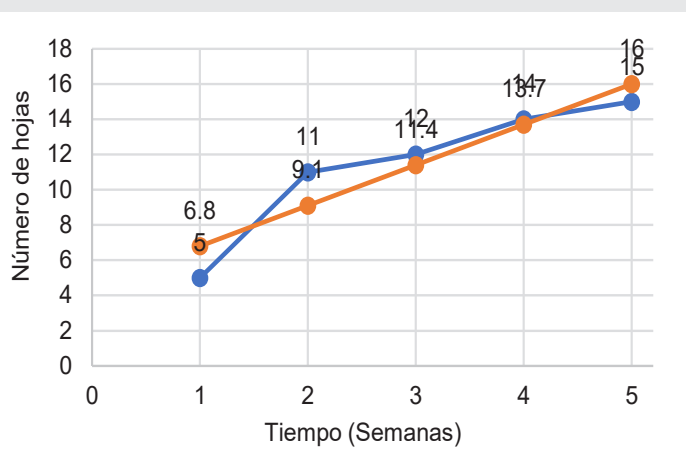
Figura 5. Brotes sanos de berro a partir de los esquejes inoculados en la cama de inundación. Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el crecimiento o el aumento de biomasa se tomó el registro de los retoños (hojas) que la planta

en estudio presentaba semanalmente, con esta información se generó por mínimos cuadrados la ecuación predictorora:

$$f(x) = 4.5 + 2.3x \quad \text{Ec. (1)}$$

Del comportamiento de los brotes, donde x es el periodo semanal por predecir y f(x) el número total de brotes en la semana x, 4,5 es el valor que toma f(x) cuando x=0 y 2.3 es el número de nuevos brotes por semana. Al graficar los nuevos brotes reales por semana (línea azul) y los nuevos brotes pronosticados por semana (línea roja), deducimos de la Gráfica 3 que la ecuación predictorora de brotes generada es de buena calidad.



Gráfica 3. Comportamiento del número promedio de hojas presente en los esquejes de *Nasturtium Officinale*.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos demostraron que la planta seleccionada, es capaz de adaptarse y generar nuevas plantas en las condiciones acuapónicas de crecimiento.

Los parámetros registrados con respecto a la calidad del agua mostraron que no hubo cambios significativos que afectaran la calidad del agua para los cultivos de peces y plantas. Lo anterior puede observarse en la Tabla 1 y 2, que muestran pocas variaciones con respecto a pH, conductividad, TDS, amoníaco, nitritos y nitratos.

Lo anterior puede deberse a que el sistema no era intensivo, tenía una baja población de peces, estaba diseñado con el tamaño del tanque mecánico y volumen de la cama de inundación mayores a las necesarias para la cantidad de peces evaluados (12 org/m³). Esto permitió mantener estables los parámetros evaluados y demostrar que bajo estas condiciones no es necesario realizar acciones correctivas sobre el sistema; solo establecer un plan de limpieza semanal del filtro mecánico que evite la acumulación de materia orgánica con la consecuente generación de compuestos químicos tóxicos para la salud de peces y plantas (NH₄, H₂S, H₂, CH₄, etc) o la migración de sólidos a la cama de inundación con las mismas consecuencias.

Tabla 1. Parámetros físicoquímicos de la calidad del agua en el sistema acuapónico.

Parámetros para determinar la calidad del agua				
Variables	Meses observados			
Parámetro	2	4	6	8
pH	7.51 ± 0.51	8.43 ± 0.22	8.19 ± 0.46	8.37 ± 0.26
Temperatura (°C)	17.63 ± 2.5	23.70 ± 1.28	25.51 ± 1.54	23.5 ± 1.54
Conductividad (µS/cm)	304.93 ± 14.74	332.06 ± 19.76	323.06 ± 10.20	556.2 ± 243.39
TDS (ppm)	125.62 ± 19.40	182.81 ± 19.99	165.68 ± 19.14	269.37 ± 100.86

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Parámetros de nitrógeno del agua en el sistema acuapónico.

Parámetros para determinar la calidad del agua				
Variables	Meses observados			
Parámetro	2	4	6	8
Amoniaco	0.21 ± 0.16	0.5 ± 0.23	0.46 ± 0.33	0.59 ± 0.35
Nitratos	1.87 ± 2.58	3.12 ± 3.72	4.37 ± 4.17	1.87 ± 2.58
Nitritos	0.18 ± 0.22	0.31 ± 0.17	0.28 ± 0.20	0.15 ± 0.18

Fuente: elaboración propia.

Los datos observados de pH en el sistema durante la mayoría del proceso fueron consistentes y estables durante todo el experimento lo que es importante porque marca un cambio entre amoniaco y amonio de ácido a básico, siendo el primero más tóxico que el segundo.

CONCLUSIONES

El diseño e implementación de un sistema acuapónico a baja escala para el cultivo de mojarra tilapia permite establecer que es posible construir con una pequeña inversión entre 6,000 - 7,000 pesos MXN, un sistema funcional que tiene los siguientes beneficios: a) Bajo consumo energético, b) Sistema de bajo mantenimiento, c) Producción peces a tallas comerciales d) Producción continua de plantas comestibles, e) Generación de alimentos sin contaminantes, f) Alta estabilidad de los parámetros del agua y; g) Cero recambio de agua, solo sustitución del agua pérdida por evaporación y drenado de lodos. Desde este punto de vista y considerando la baja intensidad del sistema, puede concluirse que cualquier familia promedio de estatus socio económico medio podría invertir en un sistema de este tipo con la finalidad de producir alimentos en casa, reducir el consumo de alimentos comerciales, generar el aprendizaje de tecnologías fáciles y sencillas de aplicar y mantener.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México / campus Misantla por brindarnos plena confianza y

apoyo. Así como al El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada No. CVU 1052663.

BIBLIOGRAFÍA

[1] ONU, "Población | Naciones Unidas," 2022, Accessed: Jan. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/global-issues/population>.

[2] G.- Merino, ; Ortega-López, ; Trejo-Téllez, ; Sánchez-Páez, ; Salazar-Marcial, and ; Salazar-Ortiz, "AQUAPONICS: SUSTAINABLE AND POTENTIAL ALTERNATIVE FOR FOOD PRODUCTION IN MEXICO."

[3] N. Zappernick et al., "Techno-economic analysis of a recirculating tilapia-lettuce aquaponics system," *J. Clean. Prod.*, vol. 365, p. 132753, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132753..

[4] K. K. Quagraine et al., "Economic analysis of aquaponics and hydroponics production in the U . S . Midwest," *J. Appl. Aquac.*, vol. 00, no. 00, pp. 1-14, 2017, doi: 10.1080/10454438.2017.1414009.

[5] D. C. Love, M. S. Uhl, and L. Genello, "Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States," *Aquac. Eng.*, vol. 68, pp. 19-27, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.AQUAENG.2015.07.003.

[6] Z. Gichana et al., "water Growth and Nutrient Removal Efficiency of Sweet Wormwood (*Artemisia annua*) in a Recirculating Aquaculture System for Nile Tilapia," pp. 1-14, 2019.

[7] D. On and A. S. Scale, "CRIANZA DE TILAPIA *Oreochromis niloticus* EN SISTEMA RAS BAJO DOS DENSIDADES A MENOR ESCALA PERU REARING OF TILAPIA *Oreochromis niloticus* IN A RAS SYSTEM UNDER TWO," vol. 3171, no. 1, pp. 53-64, 2023.

[8] M. Medellin, "Caracterización Agronómica del Berro (*Nasturtium officinale* R . Br .) y Respuesta a Diferentes Soluciones," p. 132, 2021.

[9] FAO, *Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala - Cultivo integral de peces y plantas*. FAO, 2022. doi: 10.4060/i4021es.

[10] C. G. P. Suárez, "Caracterización y optimización de la producción de alimentos a través de sistemas acuapónicos de pequeña escala," pp. 1-177, 2021, [Online]. Available: [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/128899/Suárez Cáceres%2C Gina_Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/128899/Suárez_Cáceres%2C_Gina_Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

[11] S. Shiung, N. Ling, A. Jusoh, and M. Azmi, "Biological nutrient removal by recirculating aquaponic

system : Optimization of the dimension ratio between the hydroponic & rearing tank components,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1016/j.ibiod.2015.03.012.

Urban For. Urban Green., vol. 38, no. February, pp. 397–402, 2019, doi: 10.1016/j.ufug.2019.02.001.

[12] E. J. Lobillo, C. V. M. Fernández, L. A. Bermejo, and U. L. Pérez, “Economic sustainability of small-scale aquaponic systems for food self-production,” *Agronomy*, vol. 10, no. 10, pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/agronomy10101468.

[13] Ryalcress, “Composición nutricional del berro de agua – Royalcress SA,” 2018. <https://www.royalcress.com/composicin-nutricional-del-berro-de-agua> (accessed Nov. 09, 2023).

[14] L. Cyprinus, “water Nutrient Removal Efficiency and Growth of Watercress (*Nasturtium officinale*) under Different Harvesting Regimes in Integrated Recirculating Aquaponic Systems for Rearing Common Carp,” 2020.

[15] T. A. Babatunde, K. Ibrahim, B. Abdulkarim, N. H. Wagini, and S. A. Usman, “Co-production and biomass yield of amaranthus (*Amaranthus hybridus*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) in gravel-based substrate filter aquaponic,” *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, vol. 8, pp. 255–261, Dec. 2019, doi: 10.1007/s40093-019-00297-5.

[16] A. Estim, S. Saufie, and S. Mustafa, “Water quality remediation using aquaponics sub-systems as biological and mechanical filters in aquaculture,” *J. Water Process Eng.*, vol. 30, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.02.001.

[17] I. Diatin, D. Shafruddin, N. Hude, M. Sholihah, and I. Mutsmir, “Production performance and financial feasibility analysis of farming catfish (*Clarias gariepinus*) utilizing water exchange system, aquaponic, and biofloc technology,” *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 20, no. 5, pp. 344–351, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jssas.2021.04.001.

[18] J. C. Zemor, W. Wasielesky, G. K. Fóes, and L. H. Poersch, “The use of clarifiers to remove and control the total suspended solids in large-scale ponds for production of *Litopenaeus vannamei* in a biofloc system,” *Aquac. Eng.*, vol. 85, pp. 74–79, May 2019, doi: 10.1016/j.aquaeng.2019.03.001.

[19] C. E. Boyd et al., “Achieving sustainable aquaculture : Historical and current perspectives and future needs and challenges,” no. May, pp. 578–633, 2020, doi: 10.1111/jwas.12714.

[20] A. Ascuito, E. Schimmenti, C. Cottone, and V. Borsellino, “A financial feasibility study of an aquaponic system in a Mediterranean urban context,”