

Variables productivas de lechuga (*Lactuca sativa*) - acelga (*Beta vulgaris*) y tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) en distintos sistemas acuapónicos

Productive variables of lettuce (*Lactuca sativa*), chard (*Beta vulgaris*), and tilapia, (*Oreochromis niloticus*), in different aquaponic systems

Martha Michey Cruz Cervantes¹ , Silvia Beatriz Sánchez Soto¹ , David Valdez Martínez² , Gabriel Herrera Rodríguez¹ , Pedro Hernández Sandoval¹ 

¹Departamento Académico de Ciencias Naturales y Exactas, Unidad Regional Los Mochis de la Universidad Autónoma de Occidente, C.P. 81200, Los Mochis, Sinaloa, México.

²Departamento Académico de Ingeniería y Tecnología, Unidad Regional Los Mochis de la Universidad Autónoma de Occidente, C.P. 81200, Los Mochis, Sinaloa, México.

Correspondencia: Pedro Hernández Sandoval **E-mail:** pedro.hernandez.sandoval@gmail.com

Original article | Artículo original

Palabras clave

Acuicultura
hidroponía
peces
productividad

RESUMEN | La mayoría de las prácticas acuícolas y agrícolas, a pesar de los beneficios que producen, generan impactos ambientales negativos, lo cual ha obligado a la generación de alternativas amigables con el ambiente. La acuaponía es un sistema sostenible que permite cultivar de manera simultánea plantas y animales acuáticos en un mismo espacio, siendo una opción respetuosa con el ambiente ya que se fundamenta en un sistema cerrado de recirculación y biorremediación de agua. En un sistema acuapónico se usan distintos subsistemas hidropónicos, pero es muy limitada la información sobre cuál es el más eficiente, por lo que se construyeron tres prototipos acuapónicos con distintas fracciones hidropónicas: Raíz Suspendida (RS), Sustrato Inundado (SI) y Nutrient Film Technique (NFT) para comparar su productividad en el cultivo de lechuga - acelga con tilapia. Se registraron la temperatura (°C), conductividad eléctrica (dS m⁻¹), concentración de oxígeno disuelto (mg L⁻¹), pH, nitritos (mg L⁻¹), nitratos (mg L⁻¹) y amonio (mg L⁻¹) en la fracción acuícola, biofiltros y reservorio. Los valores se mantuvieron dentro de los valores tolerables para cultivo de las especies en todos los sistemas y, en la mayoría de ellos sin diferencias significativas entre sí. La fracción hidropónica de sustrato inundado (FH-SI) mostró los mayores indicadores de productividad en ambas especies de plantas, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el crecimiento y supervivencia de la tilapia.

Keywords

Aquaculture
fish
hydroponics
productivity

ABSTRACT: Most aquaculture and agricultural practices, despite all the benefits they produce, also generate negative environmental impacts, which has forced the generation of environmentally friendly alternatives. Aquaponics is a sustainable system that allows the simultaneous cultivation of aquatic plants and animals in the same space. It is an environmentally friendly option since it is based on a closed water recirculation and bioremediation system. Different hydroponic subsystems are used in an aquaponic system, but there is very limited information on which one is the most efficient, so three aquaponic prototypes were built with different hydroponic fractions: Suspended Root (SR), Flooded Substrate (FS) and Nutrient Film Technique (NFT) to compare their productivity in the cultivation of lettuce - chard with tilapia. Temperature (°C), electrical conductivity (dS m⁻¹), dissolved oxygen concentration (mg L⁻¹), pH, nitrites (mg L⁻¹), nitrates (mg L⁻¹) and ammonium (mg L⁻¹) were recorded in the aquaculture fraction, biofilters and reservoir. The values were maintained within the tolerable values for the cultivation of the species in all systems and, in most of them, without significant differences between them. The hydroponic fraction of flooded substrate (FH-SI) showed the highest productivity indicators in both plant species; however, no significant differences were found in the growth and survival of tilapia.

INTRODUCCIÓN

La acuicultura y la agricultura son importantes actividades productoras de alimentos, contribuyen sustancialmente a la seguridad alimentaria y nutricional mundial, y es probable que se expanda aún más en respuesta a la creciente demanda de un mundo cada vez más poblado y próspero (Costello *et al.* 2020). Sin embargo, generan una gran cantidad de aguas residuales que contienen una variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos los cuales producen riesgos para la salud humana y ambiental (Xiaojing *et al.* 2024, Zahoor y Mushtaq 2023). La mayoría de las prácticas de manejo usadas favorecen la alta productividad a corto plazo, sin embargo, comprometen la productividad hacia el futuro. Al respecto, la acuaponía se

ha posicionado como una actividad productiva sustentable ya que es un proceso de crecimiento simbiótico de organismos acuáticos y plantas, en el que el efluente acuícola experimenta transformaciones microbianas que permiten su uso como fuente de nutrientes para el crecimiento de las plantas, mientras que la absorción de nutrientes realizada por las plantas remedia el agua para la acuicultura (Flores-Aguilar *et al.* 2021).

Los sistemas acuapónicos tienen el potencial de evitar numerosos problemas originados en la acuicultura y agricultura convencional, no obstante, aún hay numerosos aspectos por detallar, de tal manera que los principales factores a considerar para tener éxito en el funcionamiento de este tipo de sistemas radica en el diseño (Palm *et al.* 2018), lo cual incluye el control del pH del agua (Tyson *et al.* 2011), tecnologías de aireación y filtración (Danaher *et al.* 2013), intervalos de concentración de nutrientes aceptables (Delaide *et al.* 2016), emparejamiento de especies de plantas y peces, poblaciones microbianas, niveles de nitrógeno, cantidad y tipo de alimento (Endut *et al.* 2011), y manejo de plagas y comercialización efectiva.

El componente hidropónico de un sistema acuapónico puede ser de formas muy variadas, siendo las más conocidas biopelícula nutritiva (NFT, por sus siglas en inglés: Nutritive Film Technique), raíz suspendida o cama flotante, y sustrato inundado o combinaciones de ellos. La mayoría de las investigaciones realizadas sobre acuaponía tratan sobre productividad, calidad de agua y aspectos económicos donde se utiliza un solo tipo de subsistema hidropónico, de tal manera que la comparación simultánea de la productividad de estos se encuentra pobremente documentada. Debido a lo anterior, se determinaron las variables productivas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y acelga (*Beta vulgaris* L.) en tres sistemas acuapónicos con distintos subsistemas hidropónicos, y su posible efecto en el crecimiento de tilapias, (*Oreochromis niloticus*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en el área de acuaponía de la Universidad Autónoma de Occidente (UAdeO), Unidad Regional Los Mochis (25°48'49.51" N y 108°57'48.30" O), Sinaloa, México.

Obtención de organismos experimentales

Se preseleccionaron 200 tilapias (*Oreochromis niloticus*) de un estanque circular de 7000 L ubicado en la UAdeO. Fueron aclimatados en una tina de 3000 L por siete días, después se procedió a realizar biometría para seleccionar organismos de una talla similar e iniciar el bioensayo.

Se colocaron 200 semillas (Horta Flor ®) de *Lactuca sativa* (lechuga) y 100 de *Beta vulgaris* (acelga) en germinadores de unicel con sustrato Peat-Moss húmedo a saturación. Se mantuvieron dentro de bolsas negras para evitar la evaporación y favorecer la pronta germinación. Posteriormente las plántulas se regaron 10 días hasta presentar las características biométricas indicadas para su trasplante. El periodo experimental fue de 42 días.

Descripción de los sistemas acuapónicos

Cada sistema acuapónico (SA) estuvo compuesto de una fracción acuícola (FA), un sistema de filtros (mecánico y biológico-BF), una fracción hidropónica (FH) y un reservorio (R). El flujo de agua a través de cada SA se mantuvo utilizando tubería y conectores de PVC de dos pulgadas, siguiendo la dirección FA → BF → FH → R, este flujo fue sostenido por una bomba sumergible LTW® de 10 W, que recirculaba el agua desde el R hacia la FA. Ésta última consistió en un estanque cúbico (1 x 1 x 1 m) de 1000 L con una salida de 2 pulgadas de diámetro en la parte superior, se colocó un filtro mecánico (cubeta de 20 L) con gravilla (0,5 cm) con una malla plástica rígida como fondo falso para remoción de sólidos, este filtro se conectó por la parte superior a un filtro biológico de 80 L, el cual contenía tapas PET (25 kg) (Valdez-Martínez 2024) para después fluir hacia la FH, la cual fue de tres tipos: Raíz suspendida (RS), Sustrato inundado (SI) y Nutrient Film Technique (NFT). Posteriormente el agua fue recolectada en un reservorio (R) de 60 L a nivel del suelo, para retornar a la FA con la ayuda de una bomba sumergible como la descrita anteriormente. Se mantuvo un caudal constante en recirculación de 1,5 L min⁻¹ y un volumen total de cada SA de 1.33 m³. La densidad de siembra fue de 20 tilapias por m³ y en la FH fue de 20 plántulas por m² (15 de lechuga y cinco de acelga), con 20 cm de separación entre ellas, se colocaron en vasos plásticos de 60 mL con tela guata Delcrón como sustrato de soporte (Fig. 1). Se utilizó un diseño completamente al azar, que constó de tres tratamientos y tres replicas (3 x 3).

Para *O. niloticus* se realizó una biometría inicial y dos posteriormente cada 21 días (42 días). En el caso de *L. sativa* y *B. vulgaris* se llevó a cabo solo biometría final.

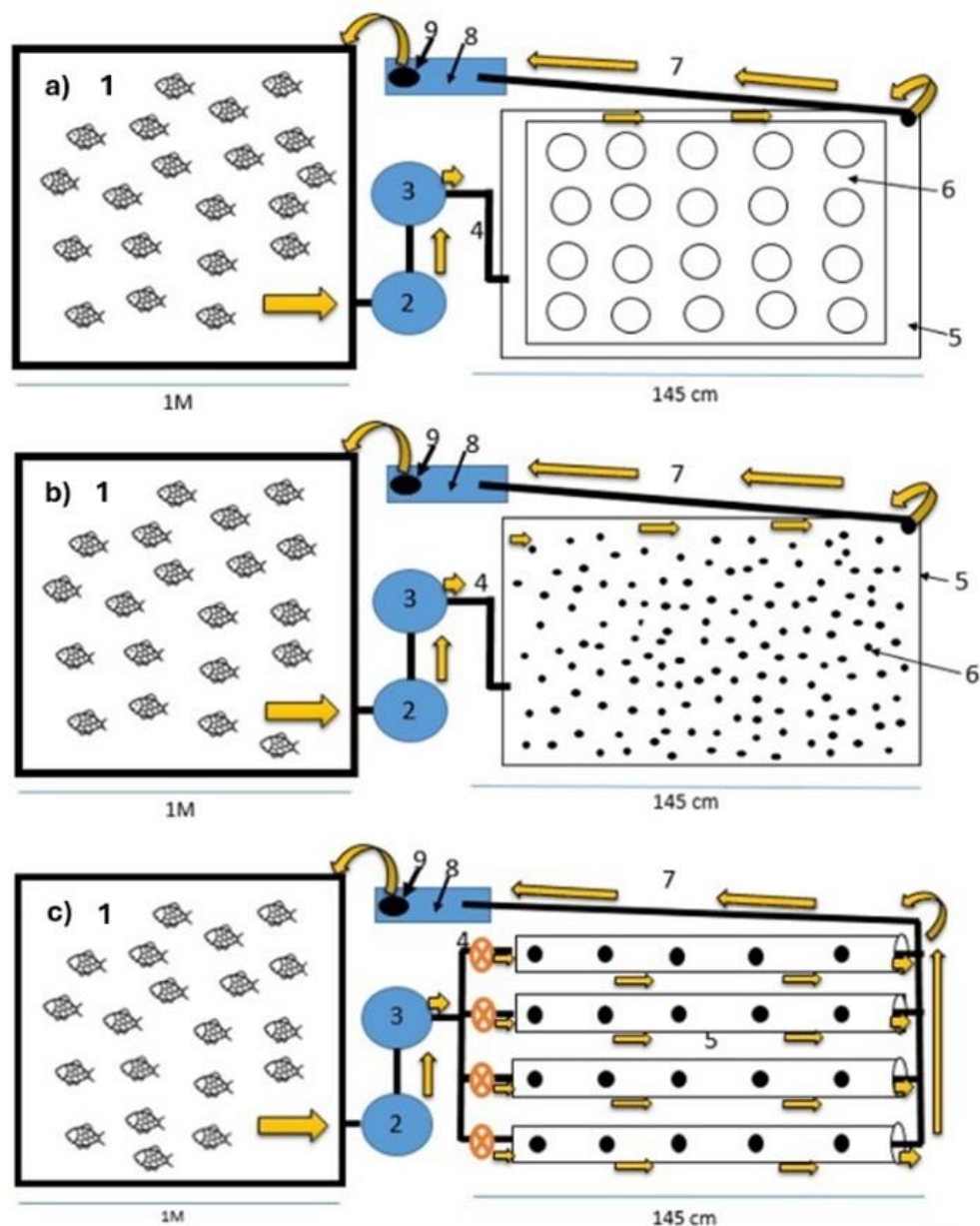


Figura 1. Esquema de los sistemas acuapónicos: 1-Fracción acuícola, 2-Filtro mecánico, 3-Filtro biológico, 4-Entrada de agua a fracción hidropónica, 5-Fracción hidropónica, 6- a) Placa de unicel, b) Gravilla 7- Drenaje, 8-Reservorio, 9-Bomba sumergible (10 W). Las flechas indican la dirección del flujo de agua; a) RS=Raíz suspendida, b) SI=Sustrato inundado, c) NFT=Nutrient Film Technique.

Figure 1. Diagram of aquaponic systems: 1- Aquaculture fraction, 2- Mechanical filter, 3 Biological filter, 4- Water inlet to hydroponic fraction, 5- Hydroponic fraction, 6- a) Styrofoam plate, b) Gravel 7- Drainage, 8- Reservoir, 9- Submersible pump (10 W). The arrows indicate the direction of water flow; a) RS = Suspended root, b) SI = Flooded substrate, c) NFT = Nutrient Film Technique.

Manejo de organismos

La densidad de cultivo fue de 20 tilapias por m³ en cada sistema (N = 180), con masa promedio inicial de 50,05 g ($\pm 1,22$), 49,97 g ($\pm 1,59$) y 50,34 g ($\pm 1,66$) y longitud media de 13,76 cm ($\pm 0,07$), 13,51 ($\pm 1,75$) y 14,02 g ($\pm 0,98$) en RS, SI y NFT respectivamente. La longitud total (LT) se midió con una cinta métrica convencional con 1 mm de precisión y la masa total (MT) con una balanza digital (Ohaus ® $\pm 0,05$ g). Al inicio del bioensayo se proporcionó alimento (NUTRIPEC ® 35% proteína) al 5% de biomasa calculada inicialmente, ajustando la cantidad después de cada biometría y de acuerdo con tabla de alimentación, proporcionando el alimento dos veces al día (09:00 y 16:00 h). Se realizaron tres biometrías, una inicial y dos más, con intervalos de tres semanas, en las que se midió el MT y LT de manera individual de la totalidad de los organismos.

Una vez germinadas las semillas de lechuga y acelga se regaron por 10 días hasta alcanzar la altura media de 5,69 ($\pm 0,19$) cm y número de hojas verdaderas 4,05 ($\pm 0,16$) respectivamente, las cuales fueron trasplantadas a vasos plásticos de 60 mL, con tela guata Delcrón como medio de soporte y colocadas en las FH a una separación de 20 cm entre cada una. La capacidad de cada sistema fue de 15 lechugas y cinco acelgas por FH. Al final del bioensayo se midió la masa total (MT, g) con una balanza digital (Ohaus® $\pm 0,05$ g), la longitud de la raíz (LR, cm) y longitud de hojas (LH, cm) se calculó con una cinta métrica convencional, se contabilizó el número de hojas (NH) y la supervivencia (S) en cada fracción hidropónica (FH).

Variables ambientales

Durante los 42 días del periodo experimental, en las FA, BF y R de cada sistema acuapónico se midieron diariamente la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y concentración de oxígeno disuelto (mg L^{-1}) con un oxímetro portátil (HANNA®, HI98193), el pH con un potenciómetro (HANNA® HI98127) y la conductividad eléctrica con un conductímetro (THE9SHOP®), también al inicio y cada dos semanas se determinó la concentración de nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4), para ello se utilizó un API Freshwater Master Test Kit®. Se siguió el fotoperiodo natural (12 h : 12 h).

Análisis estadístico

Todos los grupos de datos generados fueron sometidos a pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$) y homogeneidad de varianza (Levene, $p > 0,05$). Posteriormente se aplicó análisis de variancia (ANOVA) unifactorial ($p \leq 0,05$) y para comparación múltiple de medias se utilizó prueba de Tukey (Zar 1999). Se utilizó el software SigmaPlot v.12.5z.

RESULTADOS

Crecimiento de tilapia

Se encontraron diferencias significativas en la masa promedio de los peces al transcurrir el tiempo (Tabla 1) entre los sistemas acuapónicos (SA). Sin embargo, en la figura 2 se observa que no existieron diferencias significativas al comparar la masa promedio en cada biometría entre los tres SA. Respecto a la supervivencia, no se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de los SA ($\text{RS} = 88 \pm 4,41$; $\text{SI} = 95 \pm 2,89$; $\text{NFT} = 77 \pm 6,01$; $p > 0,05$).

Tabla I. Masa promedio de las tilapias (g) en las tres biometrías realizadas por cada tipo de fracción hidropónica en los sistemas acuapónicos.

Table I. Average mass of tilapia (g) in the three biometrics performed for each type of hydroponic fraction in the aquaponic systems.

Fracción Hidropónica	Biometría		
	I	II	III
Raíz suspendida	50,05 $\pm$ 1,22 ^a	61,21 $\pm$ 1,49 ^b	91,01 $\pm$ 3,21 ^c
Sustrato inundado	49,97 $\pm$ 1,59 ^a	61,08 $\pm$ 2,01 ^b	90,35 $\pm$ 3,51 ^c
NFT	50,34 $\pm$ 1,66 ^a	63,11 $\pm$ 1,99 ^b	95,13 $\pm$ 3,55 ^c

Letras minúsculas distintas en el superíndice indican diferencias significativas (ANOVA $p < 0,05$; Tukey $p < 0,05$). I, II y III indican el número de biometrías realizadas.

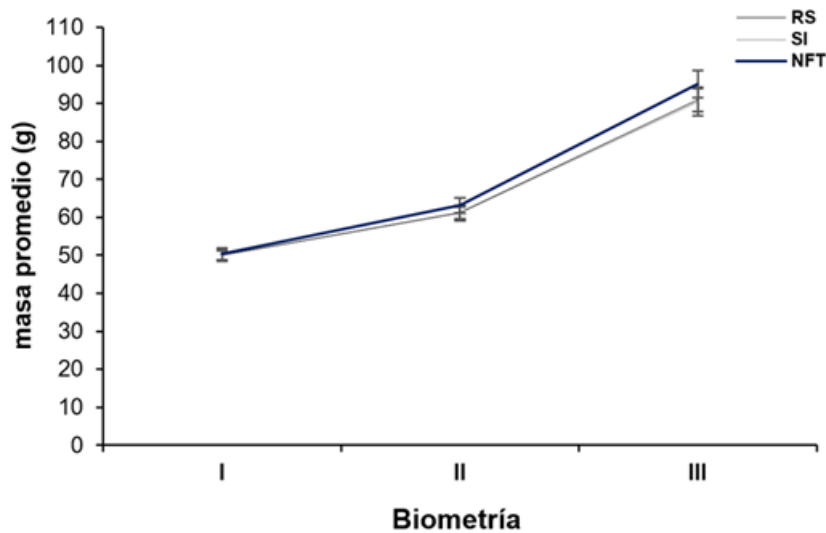


Figura 2. Aumento de masa promedio (g) de las tilapias por biometría. RS=Raíz suspendida; SI=Sustrato inundado; NFT=Nutrient film technique. I, II y III indican las biometrías realizadas.

Figure 2. Average mass increase (g) of tilapia by biometry. RS=Suspended root; SI=Flooded substrate; NFT=Nutrient film technique. I, II and III indicate the biometrics carried out.

Variables productivas de lechuga y acelga

Al final del bioensayo se encontraron diferencias significativas (ANOVA $p \leq 0,05$) entre las variables productivas en las tres fracciones hidropónicas en ambas especies, siendo la fracción hidropónica de sustrato inundado (SI) donde se obtuvieron los mejores resultados en el PT, LR, NH y LH (Tukey $p \leq 0,05$; tabla 2).

Tabla II. Comparación de variables productivas de lechuga (*Lactuca sativa*) y acelga (*Beta vulgaris*) por fracción hidropónica.

Table II. Comparison of productive variables of lettuce (*Lactuca sativa*) and chard (*Beta vulgaris*) by hydroponic fraction.

		Raíz Suspendida	Sustrato Inundado	NFT
MT	Lechuga	1,09±0,032 ^a	24,34±4,29 ^b	1,08±0,02 ^a
	Acelga	0,11±0,048 ^a	12,23±5,36 ^b	7,01±0,17 ^c
LR	Lechuga	3,29±0,35 ^a	8,95±0,42 ^b	2,82±0,28 ^a
	Acelga	3,21±0,61 ^a	8,04±1,31 ^b	3,12±0,16 ^a
NH	Lechuga	4,02±0,34 ^a	9,93±0,73 ^b	3,52±0,49 ^a
	Acelga	2,67±0,84 ^a	5,33±0,69 ^b	2,89±0,43 ^a
LH	Lechuga	2,37±0,41 ^a	16,47±0,93 ^b	2,09±0,31 ^a
	Acelga	2,06±0,35 ^a	11,99±2,25 ^b	1,82±0,15 ^a
S	Lechuga	11,1±4,4 ^a	29,6±3,4 ^b	8,9±2,2 ^a
	Acelga	13,3±3,8 ^a	26,7±3,9 ^a	22,2±5,9 ^a

MT = Masa Total; LR = Longitud de Raíz; NH = Número de Hojas; LH = Longitud de Hojas, S = Supervivencia (%). Se presentan los valores promedio ± error estándar (superíndices diferentes indican diferencias significativas, ANOVA $p < 0,05$; Tukey $p < 0,05$).

Calidad de agua

Los valores de las variables de calidad de agua en cada tipo de sistema acuapónico (SA) se muestran en la Tabla 3. En el Sistema Acuapónico de Raíz Suspendida (SA-RS), la tendencia de la temperatura se observó $R > BF > FA$ sin diferencias significativas entre R y BF, pero si entre FA con R y BF. La concentración de oxígeno disuelto fue $FA > BF > R$ sin diferencias significativas entre BF y R, pero si entre FA con R y BF. Todas las demás variables no presentaron diferencias significativas entre los puntos de muestreo (FA, BF y R).

En el Sistema Acuapónico de Sustrato Inundado (SA-SI), la temperatura en cada punto de muestreo fue $R > BF > FA$, sin diferencias significativas entre BF y FA, masa si entre R con BF y FA. La concentración de oxígeno disuelto se presentó de la siguiente manera: $FA > BF > R$, sin diferencias significativas entre BF y R, pero si entre FA y BF-R.

En el Sistema Acuapónico de Nutrient Film technique (SA-NFT), la temperatura presentó un comportamiento $R > BF > FA$, sin diferencias significativas entre BF y FA, pero si entre R con BF y FA. La concentración de oxígeno fue: $FA > R > BF$, sin diferencias significativas entre R y BF, pero si entre FA y R-BF.

Tabla III. Comparación de los promedios de las variables de calidad de agua en cada punto de muestreo en cada tipo de sistema acuapónico (RS, SI y NFT).**Table III.** Comparison of the averages of the water quality variables at each sampling point in each type of aquaponic system (RS, SI and NFT)..

	Temperatura (°C)	O ₂ disuelto (mg L ⁻¹)	pH	Conductividad (dS m ⁻¹)	NO ₂ (mg L ⁻¹)	NO ₃ (mg L ⁻¹)	NH ₄ (mg L ⁻¹)
RS							
FA	20,79±0,19 ^a	8,26±0,082 ^a	7,06±0,11	326,22±18,05	0,37±0,13	3,89±1,11	0,75±0,19
BF	21,16±0,18 ^a	7,61±0,09 ^b	6,96±0,12	333,21±17,23	0,28±0,14	7,22±1,88	0,58±0,18
R	21,68±0,20 ^b	7,56±0,11 ^b	6,95±0,12	339,73±17,78	0,28±0,15	6,67±2,64	0,67±0,19
SI							
FA	20,75±0,18 ^a	8,41±0,10 ^a	7,03±0,13	367,89±14,21	0,17±0,01	7,78±1,69	0,58±0,21
BF	20,82±0,18 ^a	7,85±0,11 ^b	7,03±0,12	373,38±14,23	0,083±0,02	6,67±1,87	0,47±0,08
R	21,84±0,18 ^b	7,81±0,11 ^b	7,03±0,12	397,01±14,33	0,14±0,01	5,51±0,56	0,47±0,11
NFT							
FA	21,12±0,17 ^a	8,43±0,08 ^a	7,05±0,12	317,44±11,27	0,28±0,14	8,89±1,62	0,53±0,10
BF	21,17±0,18 ^a	7,45±0,11 ^b	7,02±0,19	325,89±11,76	0,25±0,14	8,89±1,62	0,51±0,11
R	21,96±0,18 ^b	7,74±0,11 ^b	7,03±0,11	323,96±12,99	0,47±0,14	7,78±1,88	0,58±0,19

RS = Raíz suspendida; SI = Sustrato inundado; NFT = Nutrient film technique. FA = Fracción acuícola; BF = Biofiltro; R = Reservorio.

Letras minúsculas indican diferencias significativas entre punto de muestreo de cada sistema acuapónico (ANOVA p<0,05; Tukey p<0,05).

DISCUSIÓN

Crecimiento de tilapia

En esta investigación no se encontraron diferencias significativas entre las masas promedios finales de *O. niloticus* cultivados en los tres sistemas evaluados. De manera similar, Lennard y Leonard (2006), tampoco observaron diferencias significativas en la tasa de crecimiento específica, el factor de conversión alimenticia ni la biomasa del bacalao (*Maccullochella peelii peelii*) cultivado en sistemas acuapónicos con tres tipos de subsistemas hidropónicos (SI, RF y NFT) de lechuga (*L. sativa*). En ambos estudios, la ausencia de diferencias en las variables productivas sugiere que los filtros y subsistemas hidropónicos empleados fueron eficientes en la remoción de amonio y nitritos generados en el subsistema acuícola. Además, los autores destacan que un buen criterio para evaluar la eficiencia de un sistema acuapónico es la productividad del componente hidropónico, ya que reportaron diferencias significativas en la masa total de lechuga, en el orden SI > RF > NFT, con un valor máximo de 130 g en el sistema SI durante un periodo experimental de 21 días. Estos hallazgos coinciden con los obtenidos en el presente estudio, donde también se observó una mayor masa total promedio en el sistema SI, con valores de 24,34 g en lechugas y 12,23 g en acelgas. Esto muestra que la elección del subsistema hidropónico puede influir directamente en la eficiencia global del sistema acuapónico.

En relación con el crecimiento observado en *O. niloticus*, Ramírez-Ballesteros (2013) reportó una masa promedio final de 13,2 g después de 90 días de cultivo, valor considerablemente inferior al obtenido en el presente estudio (90,35, 91.01 y 91,13 g). Esta diferencia podría estar relacionada con las distintas densidades de cultivo utilizadas (149 peces/m³ en su estudio frente a 20 peces/m³ en este trabajo), así como con la duración del bioensayo (90 días frente a 42 días, respectivamente). Por su parte, Pandal-Baños (2019) informó masas finales promedio de 279,93 g (± 78,51) en un sistema tradicional (ST) y de 183,49 g (± 38,57) en un sistema Biofloc (BFL), tras 120 días de cultivo a una densidad de 100 peces/m³. Aunque estos valores superan a los registrados en esta investigación, es importante destacar que las masas iniciales de los organismos utilizados en dicho estudio también fueron mayores: 110,92 g (± 12,05) en ST y 108,85 g (± 12,59) en BFL, en comparación con los promedios iniciales de 50,05 g (± 1,22), 49,97 g (± 1,59) y 50,34 g (± 1,66) utilizados en este estudio. Por lo tanto, las diferencias en las condiciones iniciales del cultivo, como la biomasa inicial, la densidad de siembra y la duración del experimento, deben considerarse al momento de comparar los resultados productivos entre estudios.

Pilco (2015) evaluó el efecto de dos densidades de cultivo (50 y 75 peces/m³) sobre las variables productivas del pez *Piaractus brachipomus* en un sistema acuapónico, encontrando diferencias significativas en el crecimiento. El tratamiento con 50 peces/m³ alcanzó una masa promedio final de 70,65 g, mientras que el de 75 peces/m³ obtuvo 53,25 g, tras 120 días de cultivo. En el presente estudio, se empleó una densidad de 20 peces/m³ en los tres tratamientos, sin encontrarse diferencias significativas entre ellos. Esto sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, el tipo de FH no afecta significativamente el crecimiento de *O. niloticus*.

Juárez-Carballo (2016) evaluó los parámetros biológicos de *O. niloticus* en un SA con tres especies vegetales (*Lycopersicon esculentum*, *Capsicum annuum* y *Beta vulgaris*), comparándolo con un sistema convencional (SC) durante un periodo de 120 días y a una densidad de 20 peces/m³. En su estudio, se reportó una masa promedio final de 100,2 g en el SA, mientras que en el SC fue de 87,82 g. Estos valores son superiores a los obtenidos en la presente investigación (intervalo de 90,3–95,1 g), sin embargo, aquí el periodo experimental fue más corto (42 días), pero es importante destacar que los organismos utilizados en este estudio presentaron una masa inicial considerablemente mayor que los utilizados por Juárez-Carballo (2016), lo que podría influir en las diferencias observadas en el crecimiento final.

Variables productivas de lechuga y acelga

Ramos-Sotelo *et al.* (2021) desarrollaron un sistema acuapónico para la producción simultánea de *Lactuca sativa* y *Litopenaeus vannamei*, utilizando agua de pozo y agua de mar diluida. Las plantas alcanzaron masas promedio de 224,9 g ($\pm 7,9$) y 193 g ($\pm 9,6$), con un número promedio de hojas de 21,9 ($\pm 1,4$) y 17,8 ($\pm 1,0$), tras 50 días de cultivo. En comparación, los valores registrados en la presente investigación fueron considerablemente menores, con masas promedio de 1,09 g, 24,34 g y 1,08 g, y número de hojas de 4,02, 9,93 y 3,52 (RF, SI y NFT respectivamente). Una posible explicación para esta diferencia podría estar relacionada con el momento del trasplante, ya que Ramos-Sotelo *et al.* (2021) indican que sus lechugas fueron incorporadas al sistema acuapónico a los 30 días de germinadas, mientras que en este estudio se realizó a los 10 días. Por otro lado, Bautista *et al.* (2021) en un periodo de 36 días, lograron una masa promedio de $56 \pm 5,0$ g en lechugas cultivadas en NFT, cifra notablemente superior a la registrada en este estudio, donde tras 42 días se obtuvo una masa promedio de 24,34 g, posiblemente esta diferencia se deba a variaciones en el manejo del sistema y la variedad de lechuga utilizada, que puede influir de manera significativa en el desarrollo y rendimiento de las plantas en sistemas acuapónicos.

Holguín-Peña *et al.* (2023) compararon el crecimiento de acelga (*Beta vulgaris*) y robalo (*Centropomus viridis*) en un sistema acuapónico frente a un sistema hidropónico de raíz flotante (RF) utilizando agua de pozo y agua de pozo enriquecida con fertilizante. Tras 55 días de cultivo, reportaron un crecimiento y desarrollo óptimos de la acelga cuando se empleó el efluente proveniente del cultivo de peces, obteniendo una masa total (MT) de 161,6 g, una longitud total (LT) de 45,6 cm y un número de hojas (NH) de 10,8. Estos valores son considerablemente superiores a los registrados en la presente investigación, donde la mayor MT fue de 12,2 g y el NH máximo fue de 5,3 en SI. Sin embargo, otros estudios en sistemas hidropónicos reportan intervalos de NH₄ entre 3,75–11,63 (Ube-Troya, 2014) y 6,35–8,7 (Hlophe *et al.*, 2019), por lo que, en función de las condiciones específicas de este estudio, los resultados obtenidos pueden considerarse aceptables y técnicamente atractivos. Por otro lado, posiblemente en el trabajo de acelga con robalo existió una relación microbiana simbiótica en la fracción hidropónica, tal y como lo reportaron Venegas-González *et al.* (2019) quienes inocularon microorganismos (*Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum*) en la producción de acelga, y reportaron mayor crecimiento y producción de las plantas asociadas a la absorción nutrimental del sustrato, lo cual se reflejó en la biomasa fresca (tamaño y número de hojas). Ruiz *et al.* (2024) compararon la producción de acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) en hidroponía (RS) y un sistema acuapónico de producción de tilapia (*O. niloticus*) en invernadero, obtuvieron que el número promedio de hojas cosechadas en el sistema hidropónico fueron significativamente superiores al obtenido en el sistema acuapónico siendo de 56,56 y 44,56 respectivamente. Sin embargo, ambos resultados fueron considerablemente superiores a los obtenidos en este estudio, donde el mayor número promedio de hojas fue en SI con 5,33, las diferencias posiblemente se deban a la duración del cultivo el cual fue de 112 días mientras que el reportado aquí fue de 42.

Variables ambientales en los sistemas acuapónicos

De acuerdo con Meyer (2004), el intervalo óptimo de temperatura para el cultivo de *O. niloticus* se sitúa entre los 25 y 32 °C. Sin embargo, Somerville *et al.* (2022) señalan que esta especie puede tolerar temperaturas extremas del agua entre 14 y 36 °C por periodos cortos, aunque por debajo de los 17 °C interrumpe su alimentación y crecimiento, y temperaturas inferiores a 12 °C resultan letales. En los sistemas evaluados en la presente investigación, la temperatura del agua osciló entre 20,75 ($\pm 0,18$) °C y 21,84 ($\pm 0,18$) °C, valores por debajo del rango óptimo, lo que posiblemente limitó el crecimiento de las tilapias. En contraste, Sádaba *et al.* (2010) establecen que el intervalo ideal de temperatura y humedad relativa para el desarrollo vegetativo de la acelga se encuentra entre los 16 y 25 °C, por lo que las condiciones registradas pueden considerarse adecuadas para el crecimiento tanto de acelga como de lechuga en el sistema acuapónico.

Rakocy *et al.* (2006) señalan que, en sistemas acuapónicos, la concentración de oxígeno disuelto debe mantenerse por encima de 5 mg L⁻¹ para satisfacer las necesidades fisiológicas de las especies cultivadas, asegurar el funcionamiento adecuado del filtro biológico (Losordo *et al.*, 1999) y cubrir los requerimientos de las plantas en crecimiento. Por su parte,

de Graaf (2004) establece un valor mínimo recomendado de 3,0 mg L⁻¹ para el cultivo de tilapia, mientras que Gislerød y Adams (1983) advierten que niveles inferiores a 3-4 mg L⁻¹ pueden afectar negativamente las raíces de las plantas, limitando su desarrollo. En la presente investigación, los niveles de oxígeno disuelto se mantuvieron entre 7,45 ± 0,11 y 8,43 ± 0,08 mg L⁻¹, siendo siempre mayores en el componente acuícola que en los demás puntos de medición, lo que indica que este parámetro se mantuvo dentro del intervalo óptimo para el crecimiento tanto de los peces como de las plantas. De forma similar, Gallardo *et al.* (2014) evaluaron un sistema acuapónico integrado (*O. niloticus* - *Procambarus acanthophorus* / *Zea mays*), y registraron concentraciones de oxígeno entre 3,7 y 5,1 mg L⁻¹, temperaturas entre 25 y 30 °C, pH de 6,8 a 7,6 (en el biofiltro) y niveles de amonio entre 0,1 y 1,2 mg L⁻¹. Estos valores son comparables a los obtenidos en el presente estudio y, de acuerdo con diversos autores, son adecuados para el óptimo desarrollo de *O. niloticus* en sistemas acuapónicos.

Los intervalos óptimos de concentración de amonio en sistemas acuapónicos varían según distintos autores. Somerville *et al.* (2022) indican que los niveles ideales de NH₄⁺ deben mantenerse cercanos a cero. No obstante, se han reportado concentraciones en el intervalo de 0,25 a 1,0 mg L⁻¹, mientras que Garrido *et al.* (2020) proponen un intervalo de tolerancia más amplio, de 0,6 a 2,0 mg L⁻¹. Por su parte, Inosako *et al.* (2020) sugieren para cultivos de tilapia un intervalo óptimo entre 0,01 y 1,0 mg L⁻¹, recomendando realizar recambios periódicos de agua si se superan estos valores. En la presente investigación, las concentraciones de amonio se mantuvieron por debajo de 1,0 mg L⁻¹ en todos los puntos de muestreo y en los tres sistemas evaluados, lo que indica que esta variable se mantuvo dentro de niveles adecuados para el crecimiento de los organismos cultivados. Si bien no se observaron diferencias significativas entre los puntos de muestreo, se identificó una tendencia en las concentraciones de amonio en el siguiente orden: fracción acuícola FA > BF > R, lo que indica una adecuada eficiencia del sistema de filtrado biológico en el proceso de nitrificación. De manera consistente, las concentraciones de nitratos fueron mayores en el biofiltro y menores en el reservorio (BF > FA > R), aunque sin diferencias significativas, lo cual respalda la efectividad del proceso de transformación de compuestos nitrogenados dentro del sistema acuapónico.

CONCLUSIONES

Las mejores variables productivas de lechuga y acelga se presentaron en el sistema acuapónico con la FH de Sustrato inundado. El tipo de FH no afectó de manera significativa el crecimiento de los peces.

Declaración de conflicto de interés de los autores

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionado con el presente trabajo.

Declaración de buenas prácticas en el uso de seres vivos

Se siguieron y respetaron las pautas de bioética animal.

Declaración de contribución de autoría (CrediT)

Martha Michéy Cruz Cervantes: Diseño del experimento, metodología, visualización. Silvia Beatriz Sánchez Soto: Metodología, supervisión, visualización. David Valdez Martínez: Metodología, análisis de datos, escritura de la primera versión del artículo. Gabriel Herrera Rodríguez: metodología, análisis de datos, escritura de la primera versión del artículo. Pedro Hernández-Sandoval: Metodología, análisis de datos, edición y versión final del artículo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a estudiantes del programa educativo de Lic. en Biología, por su apoyo en la realización de los bioensayos, obtención y manejo de datos y a revisores anónimos que contribuyeron en la mejora de este manuscrito. Se agradece el financiamiento proporcionado por la Universidad Autónoma de Occidente a través del Programa Institucional para el Fortalecimiento a la Investigación (PIFIP 2024).

REFERENCIAS

- Bautista-Olivas A.L., Fernández D.R., Álvarez-Chávez C.R., Sánchez-Mexia A.C., Mendoza-Cariño M., García-Cabello K. (2021). Productividad de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en acuaponía e hidroponía. *European Scientific Journal* 17(21):283-304 <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n21p283>
- Costello C., Cao L., Gelcich S., Cisneros-Mata M.A., Free C.M., Froehlich H.E., Golden C.D., Ishimura G., Maier J., Macadam-Somer I., Mangin T., Melnychuk M.C., Miyahara M., de Moor C., Naylor R., Nøstbakken L., Ojea E., O'Reilly E., Parma A. M., Lubchenco J. (2020). The future of food from the sea. *Nature* 588:95-100. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2616-y>
- Danaher J.J., Shultz R.C., Rakocy J.E., Bailey D.S. (2013). Alternative solids removal for warm water recirculating raft aquaponic systems. *Journal of World Aquaculture Society* 44:374-383. <https://doi.org/10.1111/jwas.12040>
- De Graaf G. (2004). Optimization of the pond rearing of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus niloticus* L.) the impact of stunting processes and recruitment control. Tesis de posgrado, Wageningen University. Netherlands. <http://www.nefisco.org/downloads/PHD%20de%20Graaf.pdf>
- Delaide B., Goddek S., Gott J., Soyeurt H., Jijakli, M. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics. *Water* 8(10):467. <https://doi.org/10.3390/w8100467>
- Enduta A., Jusoh A., Ali N., Wan Nik W.B. (2011). Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment* 32:422-430. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.276>
- Flores-Aguilar P., García T.J.F., Martínez S.I. (2021). Acuaponía: Una alternativa versátil e integral en la producción de alimentos para el entorno mexicano. *Digital Ciencia* 14: 43-53. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/101>
- Gallardo-Collí A., Hernández-Vergara M.P., Pérez-Rostro C.I., Ramírez-Gutiérrez S.C. (2014). Biculture of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and crayfish (*Procambarus acanthophorus*) and production of green corn fodder (*Zea mays*) in an aquaponic system. *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science* 3(8): 233-244. <https://beta.garj.org/garjas/content/2014/August.htm>
- Garrido W.E.R., Guevara R.C.P., Martínez L.M. (2020). Manual de producción del sistema acuapónico del Centro Agroempresarial y Acuicola. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Colombia.
- Gislerød H.R., Adams P. (1983). Diurnal variations in the oxygen requirement of content and recirculating acid nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Scientia Horticulturae* 21(4):311-321. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(83\)90121-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(83)90121-8)
- Hlophe P.A., Nxumalo K.A., Oseni T.O., Masarirambi M.T., Wahome P.K., Shongwe V.D. (2019). Effects of different media on the growth and yield of Swiss chard (*Beta vulgaris* var. cicla) grown in hydroponics. *Horticulture International Journal* 3(3): 147-151. <https://doi.org/10.15406/hij.2019.03.0012>
- Holguín-Peña R.J., Ruiz-Juárez D., Medina-Hernandez D. (2023). Producción de acelga (*Beta vulgaris* var. cicla L.) con efluente del cultivo de robalo (*Centropomus viridis*) en un sistema acuapónico. *Terra Latinoamericana* 41:1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1683>
- Inosako K., Troyo-Diéguez E., Saito T., Lucero Vega G. (2020). Manual Técnico para Cultivo a Cielo Abierto usando Agua Residual de Acuaponia. Manual Técnico Sobre Acuaponía Combinada con Cultivo Cielo Abierto Adaptado en Zonas Áridas. Cibnor, México. https://www.jica.go.jp/Resource/mexico/espanol/activities/c8h0vm00007f8s9j-att/manual_sp.pdf

- Juárez-Carballo L.E. (2016). Evaluación de los parámetros biológicos de la tilapia gris *Oreochromis niloticus* mediante la implementación de un sistema acuapónico. Tesis de maestría, Universidad Veracruzana. Veracruz, México <https://www.uv.mx/pozarica/egia/files/2017/05/Luis-EnriqueJuarez.pdf>
- Lennard W.A., Leonard B.V. (2006). A comparison of three different hydroponic subsystems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. *Aquaculture International* 14:539–550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- Losordo T.M., Masser M.P., Rakocy J. (1999). Recirculating aquaculture tank production systems. Southern Regional Aquaculture Center. Texas A & M University, Texas, USA.
- Meyer D. (2004). Introducción a la Acuicultura. Escuela Agrícola Panamericana EAP Zamorano. Honduras.
- Palm H., Knaus U., Appelbaum S., Goddek S., Strauch S., Vermeulen T., Haïssam M., Kotzen B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International* 26:813-842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Pandal-Baños E. (2019). Evaluación de parámetros productivos y composición química corporal de la Tilapia gris del Nilo (*Oreochromis niloticus*) durante el periodo de engorda bajo sistemas de cultivo tradicional y con tecnología biofloc. Tesis de pregrado, Universidad nacional autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000796829
- Pilco-Vergaray J. (2015). Comportamiento productivo de dos densidades de siembra de *Piaractus brachipomus* “paco” en un sistema acuapónico superintensivo, en el iesppb. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Intercultural de la Amazonia. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNIA_bf6aa0508879e4627ea5dd3fab105cc4
- Rakocy J.E., Losordo T.M., Masser M.P. (2006). Recirculating Aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center 454:1-8. https://www.researchgate.net/publication/284496499_Recirculating_aquaculture_tank_production_systems_Aquaponics-Integrating_fish_and_plant_culture
- Ramírez-Ballesteros M. (2013). Evaluación del crecimiento de tilapia, acocil y lechuga en un sistema de recirculación acuapónico en condiciones de laboratorio. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000701607
- Ramos-Sotelo H., Pérez-Ramírez I.F., Figueroa-Pérez M.G., Fierro-Sañudo J.F., León-Cañedo J.A., Alarcón-Silvas S.G., Páez-Osuna F. (2021). Metabolite profiling and antioxidant capacity of lettuce *Lactuca sativa* var. *longifolia* grown in aquaponic system irrigated with shrimp effluents. *Biotechnia* 23(3):101-108. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i3.1454>
- Ruiz-Velazco J.M.J., de La Paz-Rodríguez G., Hernandez-Llamas A., Estrada-Pérez N. (2024). Producción de acelga (*Beta vulgaris* var. *ciclaL.*) en sistemas hidropónicos y acuapónicos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11(1):1-17. <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3866>
- Sádaba S., Uribarri A., Aguado G., del Castillo J., Astiz M. (2010). Acelga en invernadero. *Navarra Agraria* 181:23-27. <https://www.navarraagraria.com/categories/item/789-acelga-en-invernadero>
- Somerville C., Cohen M., Pantanella E., Stankus A., Lovatelli A. (2022). Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala. Cultivo integral de peces y plantas. FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura No. 589. FAO, Roma. <https://doi.org/10.4060/i4021es>
- Tyson R.V., Treadwell D.D., Simonne E.H. (2011). Opportunities and Challenges to Sustainability in Aquaponic Systems. *HortTechnology hortte* 21(1): 6-13. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6>

- Ube-Troya R.J. (2014). Adaptación y comportamiento agronómico de dos variedades de acelga (*Beta vulgaris*), sembradas mediante sistema hidropónico de raíz flotante, en la zona de Babahoyo. Tesis de pregrado. Universidad Técnica de Babahoyo, Babahoyo, Ecuador. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/683>
- Valdez-Martínez D. (2024). Evaluación del desempeño productivo de un policultivo de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) y Langostino (*Macrobrachium tenellum*) en un sistema acuapónico de Lechuga (*Lactuca sativa*), como estrategia sustentable de producción a pequeña escala. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Occidente. Sinaloa, México. <https://uadeo.mx/posgrado/doctorado/sustentabilidad/repositorio-de-tesis/>
- Venegas-González J., Méndez-Inocencio C., Martínez-Mendoza E.K., Ceja-Torres, L.F. y Rodríguez-Torres M.D. (2019). Producción orgánica de *Beta vulgaris* subespecie cicla con inoculantes microbianos. *Biotechnia* 21(3):121-126. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v21i3.1043>
- Xiaojing Liu, Yan Wang, Haiqin Liu, Yingying Zhang, Qing Zhou, Xuezheng Wen, Wenjing Guo, Zhiyong Zhang. (2024). A systematic review on aquaculture wastewater: Pollutants, impacts, and treatment technology. *Environmental Research* 262,1: 119793. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119793>
- Zahoor I., Mushtaq A. (2023). Water Pollution from Agricultural Activities: A Critical Global Review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences* 23(1):164-176. <https://www.iscientific.org/wp-content/uploads/2023/05/19-IJCBS-23-23-24.pdf>
- Zar J. (1999). Biostatistical analysis, 4th Ed. Prentice-Hall, Upper Sadd. River, N.J. 718 p.

