

Tiempo de retención hidráulico y su efecto en la productividad de acelga y carpa Koi en un sistema acuapónico

Hydraulic retention time and its effect on the productivity of Swiss chard and Koi carp in an aquaponic system

Romina García-Aguirre¹ , Israel Enrique Herrera-Díaz¹ , Daniel Díaz-Plascencia² , Pedro J. Albertos-Alpuche¹ , Rosario Martínez-Yáñez^{1*} 

¹Laboratorio de Acuicultura, Departamento de Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato – Silao km. 9, El Copal. CP. 36500. Irapuato, Guanajuato, México.

²Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua. Periférico Francisco R. Almada, km 1. CP. 33820. Chihuahua, Chihuahua, México.

*Autor de correspondencia: ar.martinez@ugto.mx

Artículo científico

Recibido: 07 de febrero 2025

Aceptado: 25 de octubre 2025

RESUMEN. La acuaponía es un sistema sostenible que combina el cultivo de peces y la producción hidropónica de plantas, donde el tiempo de retención hidráulico (TRH) influye directamente en la disponibilidad de nutrientes derivados de los desechos de los peces. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de seis TRH (40, 60, 80, 100, 120 y 140 min) sobre el rendimiento de acelga (*Beta vulgaris* var. Cicla) y el crecimiento de carpa Koi (*Cyprinus carpio* var. Koi) en un sistema acuapónico. Se cultivaron 144 plántulas durante 40 días en camas hidropónicas y se mantuvieron 350 juveniles de carpa en el estanque principal. Se evaluaron variables morfométricas vegetales (altura, número de hojas, peso hojas-tallo, peso raíz, longitud raíz, cobertura foliar), de peces (talla, peso, factor de condición, tasa específica de crecimiento) y parámetros de calidad del agua (temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica). Los resultados mostraron que el TRH influyó significativamente en el desarrollo de la acelga, siendo los tratamientos de 100-140 min los más productivos, sin afectar el crecimiento de los peces. Se identificó, además, la necesidad de suplementar oxígeno en las camas hidropónicas para mantener la salud y rendimiento de las plantas. En conclusión, un manejo hidráulico óptimo en el rango de 120 min maximiza la producción vegetal sin comprometer el bienestar y crecimiento de la carpa Koi, lo que representa una estrategia eficiente para sistemas acuapónicos de pequeña escala.

Palabras clave: Acuicultura ornamental, desempeño de crecimiento vegetal, dinámica de nutrientes, producción sostenible de alimentos, sistemas de recirculación acuícola.

ABSTRACT. Aquaponics is a sustainable system that integrates fish farming with hydroponic plant production, where the hydraulic retention time (HRT) directly influences the availability of nutrients derived from fish waste. The objective of this study was to evaluate the effect of six HRTs (40, 60, 80, 100, 120, and 140 min) on the yield of Swiss chard (*Beta vulgaris* var. Cicla) and the growth of koi carp (*Cyprinus carpio* var. Koi) in an aquaponic system. A total of 144 seedlings were cultivated for 40 days in hydroponic beds, and 350 juvenile koi carp were maintained in the main tank. Plant morphometric variables (height, number of leaves, leaf-stem weight, root weight, root length, foliar coverage), fish variables (length, weight, condition factor, specific growth rate), and water quality parameters (temperature, dissolved oxygen, pH, electrical conductivity) were evaluated. Results showed that HRT significantly influenced Swiss chard development, with treatments of 100-140 min achieving the highest productivity, without affecting fish growth. Furthermore, oxygen supplementation in the hydroponic beds was identified as necessary to maintain plant health and yield. In conclusion, optimal hydraulic management within the 120 min range maximizes plant production without compromising koi carp growth and welfare, representing an efficient strategy for small-scale aquaponic systems.

Keywords: Ornamental aquaculture, plant growth performance, nutrient dynamics, sustainable food production, recirculating aquaculture systems.

INTRODUCCIÓN

La acuaponía es un sistema sostenible que integra el cultivo de animales acuáticos y la producción hidropónica de plantas, aprovechando los desechos de los peces, transformados por bacterias, para suministrar nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas (Abentin *et al.* 2020). Este enfoque sinérgico ha demostrado ser eficiente en términos de productividad, impacto ambiental y rentabilidad económica (Verma *et al.* 2023). El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) es un parámetro clave en sistemas de recirculación acuícola que afecta la velocidad y permanencia de los afluentes y efluentes. Se define como el tiempo que permanece el agua en el sistema, o en alguno de sus componentes, antes de ser recirculada, afectando la velocidad y permanencia de los afluentes y efluentes (Camargo-Castellanos *et al.* 2021), regula el contacto entre las raíces y el agua rica en nutrientes, así como la exposición a oxígeno disuelto y la disipación de compuestos tóxicos como amonio, que es tóxico para los peces (Yang y Kim 2020, Camargo-Castellanos *et al.* 2021).

El manejo hidráulico en acuaponía determina el diseño, construcción y operación del sistema (Endut *et al.* 2010, Wallace-Springer *et al.* 2022). Altos TRH han mostrado aumentar la concentración de nitratos, oxígeno disuelto y pH favorable, lo que se traduce en mayor absorción de nutrientes, mayor biomasa vegetal y mejor rendimiento vegetal (Yang y Kim 2020). Es crucial optimizar el TRH para garantizar un equilibrio entre biomasa producida y condiciones fisiológicas favorables para las raíces y el desarrollo de las plantas (Camargo-Castellanos *et al.* 2021). En este estudio se eligió la acelga (*Beta vulgaris* var. Cicla) debido a su alto valor nutricional y comercial, lo que la convierte en una opción ideal para sistemas acuapónicos (Barickman y Kopsell 2016). Además, su ciclo de cultivo largo, de aproximadamente 60 días, y su necesidad de un sustrato húmedo constante (Rodríguez-Chiunti y Vidal-Gamboa 2020) la hacen adecuada para evaluar la eficiencia del sistema acuapónico.

Por su parte, la carpa Koi (*Cyprinus carpio* Koi), conocida por su belleza ornamental y resistencia, es una especie que se adapta a diversas condiciones ambientales, crece rápidamente y produce una gran cantidad de desechos ricos en nitrógeno, lo que la convierte en una excelente opción para el cultivo y fuente de nutrientes para las plantas en acuaponía (Heinitz *et al.* 2016, MITECO 2020). Estas características hacen de la carpa Koi una especie adecuada para estudiar su interacción con el cultivo acuícola-hidropónico de acelga. El objetivo del presente fue evaluar el efecto del TRH en la producción de acelga (*Beta vulgaris* var. Cicla) en asociación con carpa Koi en un sistema acuapónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Acuicultura del Departamento de Veterinaria y Zootecnia, ubicado en la zona de invernaderos de la División de Ciencias de la Vida (DICIVA), Campus Irapuato - Salamanca, de la Universidad de Guanajuato, localizado en la comunidad de El Copal (20.74408 N, 101.33783 W). El sistema experimental, estuvo ubicado dentro de un invernadero cubierto con plástico de luz difusa, donde la temperatura fue natural y no controlada, variando según las condiciones climáticas del entorno. El estudio se llevó a cabo en

febrero - marzo, período en el cual las temperaturas fueron más bajas, oscilando entre 18-24 °C. La exposición a luz natural fue total, con un ciclo de luz diurna de aproximadamente 12 horas, lo que simula las condiciones ambientales típicas para el crecimiento de las plantas y los peces.

Sistema acuapónico y manejo hidráulico

El sistema acuapónico estuvo compuesto por un estanque rectangular con un volumen efectivo (VEf) = 3.6 m³, interconectado con un sedimentador – clarificador (0.4 m³), un filtro biológico (1.0 m³) y 18 camas hidropónicas (CH), con una capacidad de 0.3 m³ de VEf y 1.0 m² de área de siembra cada una, donde se colocaron, placas de unicel de 1" de ancho, como base de soporte. La circulación interna de agua en el sistema se realizó por medio de la interconexión de todos los elementos (recipientes) a través de tuberías de PVC y el agua retornó al estanque en un circuito cerrado (recirculación). El movimiento interno se realizó con una bomba sumergible (BOYU DJ4P – 10 000 ECO, 10 000 L h⁻¹), y se utilizó un compresor (BOYU ACQ - 009) para inyectar aire en forma continua al estanque (30 L min⁻¹), utilizando el sistema descrito por Camargo-Castellanos *et al.* (2021). Las camas hidropónicas fueron llenadas con agua de pozo (300 L por CH) y posteriormente se inició la recirculación, asegurando un flujo constante de agua desde el estanque a las camas. Se asignaron aleatoriamente seis tiempos de retención hidráulico (TRH: 40, 60, 80, 100, 120 y 140 min) a cada cama hidropónica, con tres repeticiones por tratamiento ($n = 3$ CH; $n = 24$ plantas por cama). Para asegurar que cada cama mantuviera el caudal correspondiente al TRH asignado, se ajustó diariamente la velocidad del afluente, según el tratamiento asignado.

Organismos experimentales

Plantas

Se utilizaron 144 plántulas de *Beta vulgaris* variedad Cicla, adquiridas de un invernadero especializado en germinación de semillas, ubicado en la región cercana al municipio de Celaya, Guanajuato. En el laboratorio, las plántulas fueron colocadas en una cama hidropónica, donde el agua circulaba desde el estanque que contenía a los peces, permitiendo su aclimatación a las condiciones del agua y del microambiente durante un período de 7 días. Posteriormente, se distribuyeron al azar 8 plántulas ($n = 8$) por cama hidropónica (total de 18 camas), sobre placas de unicel de 1" de ancho. Las plántulas se cultivaron durante 40 días bajo estas condiciones. Se administró hierro quelado al 13% (200 g disueltos en 1 L de agua), en cinco ocasiones a lo largo del cultivo. También se aplicaron nutrientes foliares (10 mL L⁻¹) para corregir la clorosis observada en algunas plantas y se utilizó una solución de agua con jabón para controlar oídio. Las hojas viejas y largas que entraban en contacto con el agua fueron removidas para prevenir putrefacción. La cosecha final se realizó cortando las plantas por el tallo desde la base de la placa de unicel, con navajas y cuchillos esterilizados, extrayendo las raíces del agua con cuidado, ya que estaban enredadas entre sí.

Peces

Se utilizaron 350 juveniles de *Cyprinus carpio* variedad Koi (31.15 ± 8.30 g, 12.33 ± 1.42 cm y 1.66 ± 0.31 K de Fulton), los cuales fueron tomados de la colección de organismos del Laboratorio de Acuicultura. Dichos especímenes fueron adquiridos en una granja acuícola ubicada en Ixtlán, Michoacán de Ocampo y ya tenían alrededor de 7 meses en el laboratorio. Los juveniles de Carpa

Koi fueron alimentados tres veces al día a las 9:00, 13:00 y 17:00 h con 70 g de alimento peletizado fase 2 para tilapia (*Oreochromis niloticus*), que contenía un 30% de proteína. La cantidad total diaria de alimento administrado fue de 210 g, correspondiente a una tasa de alimentación del 3% del peso corporal estimado de los peces por día.

Indicadores productivos de *Beta vulgaris* variedad Cicla

Con el propósito de establecer los indicadores de producción de *B. vulgaris* variedad Cicla se calculó la densidad de biomasa por m². Después del trasplante de las plántulas de acelga a las CH, los lunes, miércoles y viernes de cada semana, se llevó a cabo la captura de imágenes fotográficas de cada CH por separado, con el fin de procesarlas con la App móvil Canopeo. La cual, es una herramienta rápida y precisa para calcular la cobertura del tapiz vegetal o dosel. Esta aplicación cuantifica el porcentaje de cubierta vegetal verde viva de cualquier cultivo agrícola a partir de fotografías o videos obtenidas con el teléfono móvil.

Así mismo, se realizaron mediciones de biometría para las hortalizas al inicio y al final de los 40 días que duró el experimento, las cuales fueron: altura (longitud del ápice de la hoja más alta al tallo, cm), largo de raíz (cm), número de hojas, peso de las hojas y el tallo (g), y peso de la raíz (g). Las mediciones de longitud se realizaron con un ictiómetro (Pentair Aquatic Ecosystems) y las de peso con una báscula de precisión 3 kg ± 0.2 g marca RHINO BAPRE-3.

Con los resultados que mostraron estas mediciones se hizo el cálculo de la tasa absoluta de crecimiento mediante la siguiente fórmula:

Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC)

$$TAC, g \text{ planta día}^{-1} = \frac{P_2 - P_1}{t}$$

Dónde, P₁ y P₂: son el peso inicial y peso final de materia fresca de la planta, en gramos y t: número de días en el período experimental.

Además, semanalmente, los lunes por la mañana, se efectuó un muestreo en donde se midió, con un flexómetro, la altura de las plantas (cm) tomando como base la placa de unisel. También, se contó el número de hojas de cada planta de acelga (*Beta vulgaris* var. Cicla).

Indicadores de bienestar animal

Para definir el estado de las carpas Koi (*Cyprinus carpio* var. Koi) se determinaron las siguientes variables, como indicadores externos de bienestar animal (Martínez-Yáñez *et al.* 2025): la talla (cm) de la boca a la parte final de la aleta caudal, el peso húmedo vivo (g) y la condición corporal (K). El equipo que se utilizó en las mediciones fue un ictiómetro (Pentair Aquatic Ecosystems) para la talla y una báscula de precisión 3 kg ± 0.2 g (RHINO BAPRE-3) para el peso. Estas determinaciones biométricas se realizaron al inicio y al final de los 40 días de experimento.

Posteriormente, con los datos de talla y peso, se calcularon la condición corporal y la tasa específica de crecimiento por medio de las siguientes fórmulas:

K de Fulton (pez)

$$K = 100 \left(\frac{P}{L^3} \right)$$

Dónde, K: factor de condición K de Fulton, P: peso del pez en gramos y L: longitud del pez en centímetros.

Tasa Específica de Crecimiento

$$TEC, \% \text{ día}^{-1} = \left[\frac{(\ln Ph_2 - \ln Ph_1)}{t} \right] * 100$$

Dónde, Ph₁ y Ph₂: son el peso inicial y peso final húmedo del pez (en gramos), Ln: es el logaritmo natural y t: número de días en el período experimental.

Indicadores de calidad de agua

En los 40 días que duró el experimento se midieron parámetros relacionados con la calidad del agua del sistema acuapónico (una vez al día, después de la primera toma de alimento de las carpas, entre las 9:00 y 9:15 h), los cuales fueron: pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), concentración de oxígeno disuelto (mg L^{-1}) y presencia de amoníaco. Las mediciones se realizaron en una esquina de la columna de agua del estanque de las carpas y al centro de las camas hidropónicas, a excepción de la presencia de amoníaco que se hizo con un monitor adherido a una de las paredes de la CH número 9 del sistema. Para ejecutar la monitorización de estos indicadores se utilizaron medidor de pH portátil (EcoSense pH10), medidor TDS y EC (Hanna), medidor de oxígeno disuelto (multiparamétrico YSI Mod. 20 Plus) y monitor permanente de amoníaco (Seachem).

Análisis estadístico

Se utilizó un arreglo completamente al azar. Para determinar la homogeneidad de la matriz de varianzas – covarianzas se utilizó una prueba de M de Box. El estudio de los datos de las variables morfométricas se llevó a cabo por medio de un análisis de Componentes Principales. Previamente se evaluó la homogeneidad de éstos. Posteriormente, se realizó una Correlación de Pearson y un análisis de MANOVA con permutaciones (9 999), y la diferencia entre las medias se determinó con un ajuste de Bonferroni ($p < 0.01$). Para analizar la variable cobertura a lo largo del período experimental, se utilizó un modelo mixto con medidas repetidas en el tiempo, mediante un modelo lineal general. El modelo incluyó los efectos fijos de los tratamientos, los días, la interacción tratamiento por día, el efecto aleatorio del promedio del % de cobertura de las plantas de cada cama hidropónica anidada dentro del tratamiento y el error residual. Las camas hidropónicas fueron la unidad experimental sobre las que se realizaron las medidas repetidas durante el período experimental (tiempo en días).

$$\text{Modelo: } Y_{ijk} = \mu + T_i + F_j + (TF)_{ij} + \beta(\text{Est})_k + \epsilon_{ijk}$$

Dónde, Y_{ijk}: variable dependiente (cobertura de las plantas por cama hidropónica, %), μ : media general, T_i: efecto del i-ésimo tratamiento, F_j: efecto del j-ésimo día, (TF)_{ij}: interacción del tratamiento por día, $\beta(\text{Est})_k$: efecto de la cama hidropónica anidada dentro del tratamiento y ϵ_{ijk} : error residual.

En cuanto a las demás variables, se utilizó un ANOVA de una vía y las medias entre los tratamientos se compararon utilizando la prueba de Bonferroni (Casas y Veitía 2008), con un efecto

significativo cuando $p < 0.05$. Los paquetes estadísticos utilizados fueron Statgraphics Centurión 18 y PAST 4.13.

RESULTADOS

Indicadores productivos de *Beta vulgaris* variedad Cicla

Los valores iniciales y finales de las variables morfométricas de las acelgas (*B. vulgaris* var. Cicla) pueden observarse en las Tabla 1.

Tabla 1. Valores iniciales y finales de *Beta vulgaris* var. Cicla de acuerdo con el tratamiento.

Variable	Tiempo de Retención Hidráulico (min)					
	40	60	80	100	120	140
Plántulas (siembra)						
No. hojas verdaderas	5.58 ± 2.04	4.12 ± 1.98	4.70 ± 1.89	4.62 ± 1.37	5.87 ± 1.26	5.08 ± 1.66
g						
Peso total	2.37 ± 0.66	1.93 ± 0.75	2.05 ± 0.51	2.08 ± 0.76	2.12 ± 0.56	1.96 ± 0.65
cm						
Longitud total	20.47 ± 2.96	20.35 ± 3.49	20.08 ± 2.53	19.70 ± 2.21	19.75 ± 3.19	19.20 ± 2.35
Longitud tallo – hoja	7.75 ± 0.83	7.68 ± 1.30	7.75 ± 1.17	7.70 ± 0.97	7.10 ± 0.89	7.64 ± 0.86
Longitud raíz	12.72 ± 2.84	12.66 ± 2.83	12.33 ± 1.88	12.00 ± 2.25	12.64 ± 2.86	11.56 ± 1.96
Plantas (cosecha)						
No. hojas verdaderas	34.12 ± 10.16	29.83 ± 12.25	32.87 ± 10.35	32.79 ± 10.29	34.75 ± 10.97	30.45 ± 9.04
g planta día⁻¹ (materia fresca)						
Tasa Absoluta de Crecimiento	24.37 ± 5.49	23.22 ± 5.51	22.13 ± 3.77	20.75 ± 4.31	19.51 ± 3.52	17.76 ± 4.24
kg						
Peso total	0.977 ± 0.22	0.931 ± 0.22	0.887 ± 0.15	0.832 ± 0.17	0.782 ± 0.14	0.712 ± 0.17
Peso tallo - hoja	0.776 ± 0.19	0.734 ± 0.17	0.697 ± 0.12	0.650 ± 0.13	0.615 ± 0.11	0.554 ± 0.16
Peso raíz	0.201 ± 0.06	0.196 ± 0.06	0.189 ± 0.05	0.181 ± 0.06	0.167 ± 0.05	0.158 ± 0.05
cm						
Longitud total	132.5 ± 16.4	124.3 ± 13.8	132.8 ± 14.9	123.3 ± 11.5	118.4 ± 13.4	115.3 ± 11.4
Longitud tallo - hoja	60.18 ± 6.76	60.66 ± 7.39	62.18 ± 8.61	57.12 ± 5.15	56.39 ± 8.99	54.62 ± 7.84
Longitud raíz	72.37 ± 13.14	63.68 ± 12.02	70.68 ± 13.22	66.18 ± 10.07	62.02 ± 10.21	60.68 ± 8.25

Medias ± DE.

La prueba de M de Box mostró que las matrices de varianza-covarianza eran homogéneas ($p = 0.1320$). El análisis de componentes principales (ACP), reveló dos componentes principales con valores propios mayores a 1, los cuales, explicaron el 57.57% de la variación total de los datos (Tabla 2). Las variables con mayor contribución a la explicación de la variación fueron el Peso hojas - tallo y el Peso raíz, según sus eigenvectores (Tabla 2, Figura 1). El primer componente (horizontal), mostró una clara separación entre los tiempos de retención hidráulico (TRH), particularmente entre 40 y 140 minutos. En este eje, las variables que más contribuyeron fueron el Peso hojas - tallo y el

Peso raíz. El segundo componente (vertical) destacó una separación entre los tratamientos de 60 y 120 minutos de TRH, siendo la Longitud raíz la variable que más aportó a la variación en este eje.

Tabla 2. Análisis de componentes principales y Eigenvectores de las variables morfométricas de las acelgas (*B. vulgaris* var. Cicla) cultivadas en acuaponía.

Componente	Eigenvalor	% varianza	%Varianza acumulada	Variable	Componente 1	Componente 2
1	1.80876	36.17	36.17	Longitud hoja - tallo	0.4253	-0.29094
2	1.06989	21.39	57.57	Longitud raíz	0.16947	-0.804363
3	0.821303	16.42	73.99	No. hojas	0.406263	0.502158
4	0.750039	15.00	89.00	Peso hojas - tallo	0.59606	-0.0160327
5	0.550003	11.00	100	Peso raíz	0.519675	0.126234

Valor en rojo: indica el acumulado de los 2 componentes extraídos (eigenvalor mayor a 1.0).

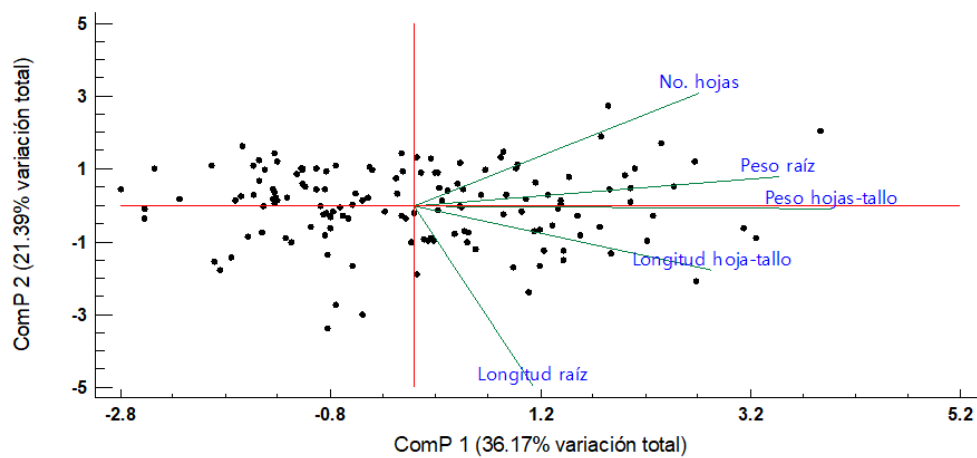


Figura 1. Análisis de Componentes Principales para las variables morfométricas de acelgas (*B. vulgaris* var. Cicla) cultivadas en acuaponía.

En concordancia con el ACP, las correlaciones de Pearson indicaron que el Peso hojas - tallo mostró una correlación baja con la Longitud hoja - tallo y el Número de hojas. De igual forma, el Peso raíz presentó una correlación baja con la Longitud hoja - tallo y el Número de hojas, pero una correlación moderada con el Peso hojas – tallo (Tabla 3).

Tabla 3. Correlación de Pearson de las variables morfométricas evaluadas.

	Longitud hoja - tallo	Longitud raíz	No. hojas	Peso hojas - tallo
Longitud raíz	0.1150 (---)			
No. hojas	0.1034 (---)	-0.0525 (---)		
Peso hojas - tallo	0.3007 0.0002	0.1429 (---)	0.3004 0.0003	
Peso raíz	0.1986 0.0170	0.0467 (---)	0.2202 0.0080	0.4001 0.0000

El PERMANOVA aplicado a las variables morfométricas también mostró diferencias estadísticas significativas entre los TRH (pseudo-F = 3.32, $p = 0.0001$). Los análisis post hoc con ajuste de Bonferroni mostraron que en las variables morfométricas había diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.01$) entre los TRH 40 y 140, 40 y 120, 60 y 140 y 80 y 140 min (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación entre pares de medias (ajuste de Bonferroni).

TRH	40	60	80	100	120	140
40						
60	---					
80	---	---				
100	---	---	---			
120	0.0075	---	---	---		
140	0.0015	0.0075	0.003	---	---	

En la Figura 2, se puede apreciar el efecto del TRH en la producción de biomasa comestible (Peso hojas - tallo) y la tasa absoluta de crecimiento. Para la variable cobertura no se observaron diferencias estadísticas entre los TRH, pero si entre el tiempo (días) ($p = 0.0000$). El análisis de modelo lineal general (MLG) para la variable cobertura (%), para los factores TRH y días, y la interacción entre los mismos. No se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, pero si entre los días. No se registró un efecto estadísticamente significativo en dicha interacción. Los resultados muestran que la cobertura es directamente proporcional al número de días del cultivo. El R^2 del análisis estadístico indica que el modelo utilizado explica el 99.58% de la variabilidad de los valores obtenidos de la cobertura de las plantas (%) (Figura 3).

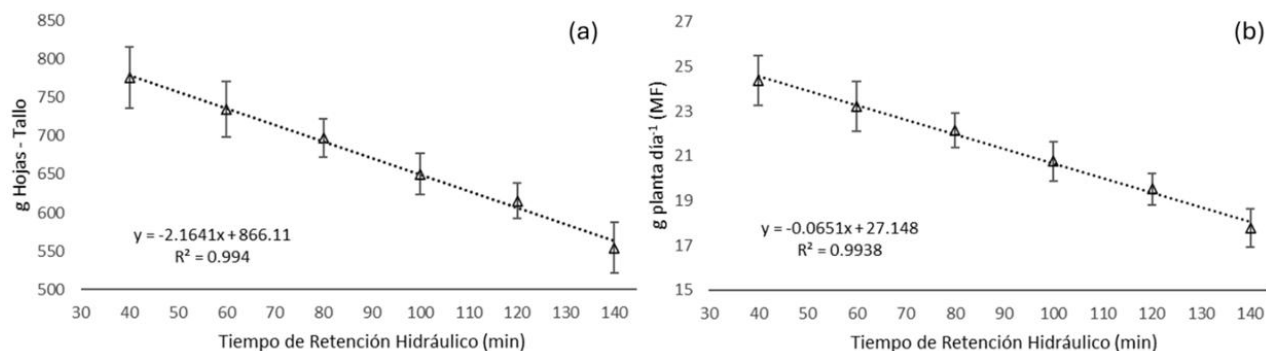


Figura 2. (a) Producción de biomasa y (b) tasa absoluta de crecimiento de acelgas (*Beta vulgaris* var. Cicla) cultivadas en acuaponía de acuerdo con el tiempo de retención hidráulico. Medias $\pm$ EE. ANOVA de una vía, diferencias entre medias por Bonferroni. MF: materia fresca.

Indicadores de bienestar animal y calidad de agua

En cuanto a los peces, no se observaron signos de enfermedad, tampoco se presentó mortalidad. Los valores finales de biometría fueron 41.92 ± 5.92 g, 14 ± 1.46 cm, 1.67 ± 0.24 K de Fulton y una TEC de 0.74% animal día⁻¹. Las características de la calidad de agua se pueden observar en la Tabla 5. No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para las variables pH, CE y temperatura; sin embargo, sí se observaron diferencias para el oxígeno disuelto (Figura

4). En cuanto a los indicadores de calidad de agua en el estanque de peces, los valores registrados fueron 7.47 ± 0.16 , 1631.23 ± 86.06 , 20.68 ± 1.04 y 6.85 ± 0.65 para pH, CE, temperatura y OD respectivamente (medias $\pm$ DE).

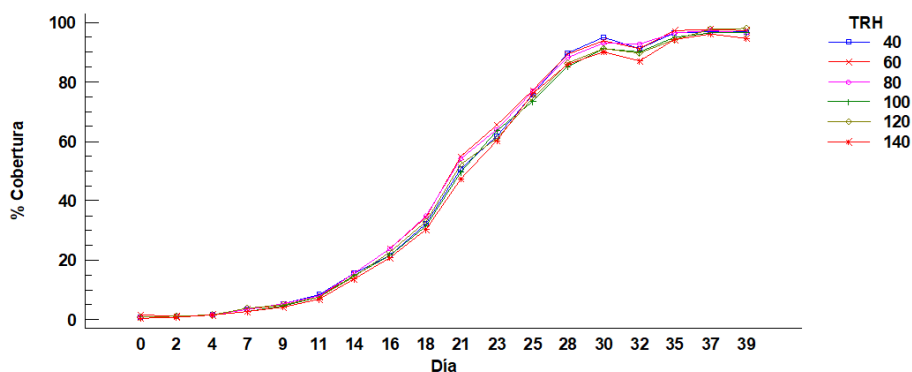


Figura 3. Cobertura (%) de acelgas (*B. vulgaris* var. Cicla) de acuerdo con el tiempo de retención hidráulico por días de cultivo en acuaponía. Medias. Modelo Lineal General, $R^2 = 99.58\%$.

Tabla 5. Indicadores de calidad de agua de las camas hidropónicas por tratamiento.

Variable	Tiempo de Retención Hidráulico (min)					
	40	60	80	100	120	140
pH	7.47 ± 0.13	7.47 ± 0.13	7.47 ± 0.13	7.47 ± 0.14	7.47 ± 0.14	7.47 ± 0.14
CE	1658.17 ± 102.5	1656.75 ± 99.7	1655.84 ± 97.7	1655.43 ± 100.5	1654.61 ± 100.1	1653.05 ± 100.8
T°C	20.79 ± 1.06	20.79 ± 1.06	20.79 ± 1.05	20.79 ± 1.06	20.80 ± 1.06	20.81 ± 1.06
OD	6.13 ± 0.01	6.02 ± 0.125	5.92 ± 0.06	5.92 ± 0.06	5.76 ± 0.03	5.67 ± 0.07

Medias $\pm$ DE. CE: conductividad eléctrica, T: temperatura, OD: oxígeno disuelto.

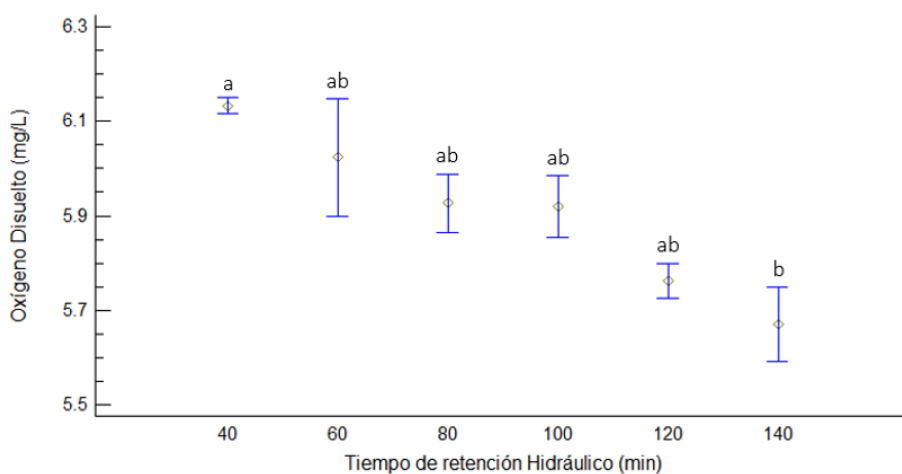


Figura 4. Concentración de oxígeno disuelto en camas hidropónicas de acuerdo con el tiempo de retención hidráulico. Medias $\pm$ EE. ANOVA de una vía, diferencias entre medias por Bonferroni.

DISCUSIÓN

Indicadores productivos de *Beta vulgaris* var. Cicla

La tasa de carga hidráulica es una herramienta clave para lograr un crecimiento equilibrado de peces y plantas en acuaponía (Shete *et al.* 2016), y el control del TRH se vuelve crítico para maximizar la eficiencia del sistema. En este estudio, los TRH más bajos favorecieron la producción de biomasa foliar y radicular de acelga, lo que sugiere una mayor disponibilidad y renovación de nutrientes en la zona radicular. Dado que las hojas constituyen la fracción comestible y de valor económico, este efecto tiene relevancia directa para la rentabilidad del cultivo. Además, el peso radicular complementa la interpretación, pues refleja la capacidad de absorción y translocación de nutrientes hacia biomasa aérea. La separación estadística observada entre tratamientos cortos (40–60 min) y largos (120–140 min) indica que la frecuencia de recirculación influye no sólo en la cantidad de nutrientes disponibles, sino también en el tiempo de exposición a condiciones subóptimas como baja oxigenación. Resultados similares fueron reportados por Dediu *et al.* (2011), en sistemas con esturión y lechuga, donde la variación en TRH modificó la tasa de crecimiento relativa y el rendimiento final. En nuestro caso, aunque el área foliar no mostró diferencias significativas, la biomasa total sí lo hizo, lo que sugiere que las plantas pueden mantener cobertura, pero con distinto grado de acumulación de materia seca. Esto abre la posibilidad de que la densidad de plantación pueda ajustarse en función del TRH, optimizando la producción por superficie cultivada. El trabajo de Yang y Kim (2020) apoya esta interpretación, al mostrar que TRH más cortos incrementan oxígeno disuelto y concentración de nitratos, reducen la exposición al amoníaco y favorecen el rendimiento de cultivos de rápido crecimiento. Nuestros resultados coinciden parcialmente: la acelga respondió positivamente a TRH menores en términos de biomasa, aunque su respuesta en cobertura foliar fue estable, lo que puede indicar una adaptación a aprovechar el espacio disponible independientemente del flujo de nutrientes. Este comportamiento podría representar una ventaja de la acuaponía frente a hidroponía tradicional, donde la limitación espacial es más crítica.

Indicadores de bienestar animal y calidad de agua

El crecimiento del 34.5% en peso de carpa Koi durante el ciclo experimental confirma que no fueron comprometidos el bienestar ni el desempeño zootécnico de los peces, lo que respalda la viabilidad del cultivo integrado, la ausencia de mortalidad y signos clínicos refuerza dicha integración. Sin embargo, en cuanto a la calidad de agua, se evidenció una relación inversa entre TRH y concentración de oxígeno disuelto (OD) en las camas hidropónicas, lo que puede impactar directamente la absorción de nutrientes por las raíces de acelga. Como señala Dacey (1980) y Carbone (2015), la disponibilidad de O₂ es determinante para la respiración radicular y el transporte activo de iones, y su deficiencia conduce a acumulación de compuestos como CO₂ o amoníaco, que limitan la captación de nitrógeno y potasio. Esto coincide con la propuesta de Sinha (2004), quien explica que el metabolismo del nitrato a amonio depende de un adecuado aporte de oxígeno para la síntesis de aminoácidos esenciales. Nuestros hallazgos sugieren que, aunque la recirculación frecuente favorece el rendimiento vegetal, el diseño del sistema debe contemplar la suplementación de oxígeno en camas hidropónicas para evitar zonas hipóxicas. Estudios previos en hidroponía (Lenzi *et al.* 2010, Ikeura *et al.* 2017) han demostrado que la aireación —especialmente con

microburbujas— mejora la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular. Incorporar este manejo en acuaponía podría potenciar aún más los beneficios de TRH cortos, evitando el estrés radicular por falta de O₂.

Implicaciones prácticas y proyección

En conjunto, la evidencia sugiere que para sistemas acuapónicos de pequeña escala con acelga y carpa Koi, un TRH cercano a 120 min permite equilibrar productividad vegetal y bienestar animal, siempre que se garantice una oxigenación suficiente en la zona radicular. Este ajuste puede mejorar la eficiencia global del sistema, reducir riesgos de acumulación de compuestos tóxicos y optimizar el uso de recursos hídricos y energéticos. Futuras investigaciones deberían explorar la interacción entre TRH y técnicas de oxigenación en camas hidropónicas, evaluando no sólo la biomasa final, sino también parámetros fisiológicos como tasa fotosintética y eficiencia de uso de nutrientes.

CONCLUSIONES

El tiempo de retención hidráulico influyó de manera significativa en la productividad de acelga (*Beta vulgaris* var. Cicla) cultivada en acuaponía con carpa Koi (*Cyprinus carpio* var. Koi), observándose un mayor rendimiento de biomasa en tiempos de retención cortos. La relación inversa entre el TRH y la concentración de oxígeno disuelto en las camas hidropónicas sugiere que la disponibilidad de oxígeno es un factor determinante para el crecimiento de las plantas en este sistema. Estos hallazgos confirman la viabilidad del cultivo integrado de hortalizas y peces ornamentales, aportando evidencia para optimizar el manejo hidráulico en sistemas acuapónicos orientados tanto a la producción alimentaria como ornamental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Vianey Olmedo Monfil, Dra. Suria Gisela Vásquez Morales y al Dr. Juan Pablo Huchin Mian, por las contribuciones a la tesis de licenciatura de la Bio. García Aguirre.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

Abentin E, Muhd Shaleh SR, Shapawi R, Saufie S, Mustafa S (2020) Maximizing efficiency and sustainability of aquatic food production from aquaponics systems: a critical review of challenges and solution options. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 20(1): 59-74. https://doi.org/10.4194/2618-6381-V20_1_08

- Barickman TC, Kopsell DA (2016) Nitrogen form and ratio impact Swiss chard (*Beta vulgaris* subsp. cicla) shoot tissue carotenoid and chlorophyll concentrations. *Scientia Horticulturae* 204: 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.007>
- Camargo-Castellanos J, Flores-García L, Herrera-Díaz I, Álvarez-González C, Albertos-Alpuche P, Martínez-Yáñez R (2021) System management of *Lemna minor* in aquaponics. *Aquaculture Research* 52(11): 5461-5475. <https://doi.org/10.1111/are.15637>
- Carbone A (2015) Modificación artificial del ambiente: cultivos protegidos. En: Beltrano J, Gimenez D (eds) Cultivo en hidroponía. Editorial Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires, Argentina. pp: 140-166.
- Casas CG, Veitía N (2008) Aplicación de métodos de comparaciones múltiples en Biotecnología Vegetal. *Biotecnología Vegetal* 8(2): 67-71.
- Dacey JW (1980) Internal winds in water lilies: An adaptation for life in anaerobic sediments. *Science* 210(4473): 1017-1019. <https://doi.org/10.1126/science.210.4473.1017>
- Dediu L, Cristea V, Xiaoshuan Z (2011) Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with baster and lettuce. *African Journal of Biotechnology* 11(9): 2349-2358. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2829>
- Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan N, Hassan A (2010) A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology* 101(5): 1511-1517. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040>
- Heinitz MC, Lemme A, Schulz C (2016) Measurement of digestibility in agastric fish based on stripping method: apparent nutrient, energy and amino acid digestibilities of common feed ingredients for carp diets (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture Nutrition* 22(5): 1065-1078. <https://doi.org/10.1111/anu.12324>
- Ikeura H, Tsukada K, Tamaki M (2017) Effect of microbubbles in deep flow hydroponic culture on spinach growth. *Journal of Plant Nutrition* 40(16): 2358-2364. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346663>
- Lenzi A, Baldi A, Tesi R (2010) Growing spinach in a floating system with different volumes of aerated or non-aerated nutrient solution. *Advances in Horticultural Science* 25(1): 21-25. <https://doi.org/10.13128/AHS-12780>
- Martínez-Yáñez R, Mora-Medina P, Albertos-Alpuche PJ (2025) EPI-DOM approach for comprehensive assessment of integral animal welfare. *Frontiers in Animal Science* 6: 1495149. <https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1495149>
- MITECO (2020) Ficha técnica *Cyprinus carpio* – Carpa común. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-especies/mtjcyprinuscarpio_tcm30-523161.pdf. Fecha de consulta: 3 diciembre 2024.
- Rodríguez-Chiunti M, Vidal-Gamboa A (2020) Simulación del requerimiento hídrico en el cultivo de acelga bajo malla sombra para un uso sustentable del agua en Cosamaloapan, Veracruz. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable* 5(2): 569-580.
- Shete A, Verma A, Chadha N, Prakash C, Peter R, Ahmad I, Nuwansi K (2016) Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with common carp (*Cyprinus carpio*) and mint (*Mentha arvensis*). *Aquacultural Engineering* 72: 53-57. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.04.004>
- Sinha RK (2004) Modern plant physiology. Alpha Science International, Pangbourne, UK, 608p.
- Tanaka G, Yamashita Y, Nakabayashi K (2000) Effect of supersaturation of dissolved oxygen on the growth of tomato plants and nutrient uptake in hydroponic culture. *Journal of the Society of High Technology in Agriculture* 13(1): 21-28. <https://doi.org/10.2525/jshita.13.21>

- Verma AK, Chandrakant MH, John VC, Peter RM, John IE (2023) Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): emerging trends and future prospects. *Technological Forecasting and Social Change* 191: 122709. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122709>
- Wallace-Springer N, Wells DE, Pickens JM, Ayipio E, Kemble J (2022) Effects of hydraulic retention time of aquaculture effluent on nutrient film technique lettuce productivity. *Agronomy* 12(10): 2570. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102570>
- Yang T, Kim H (2020) Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Scientia Horticulturae* 256: 108619. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>