

Validación del rendimiento productivo de tilapias (*Oreochromis sp.*), tomate (*Lycopersicum esculentum L.*) y chile dulce (*Capsicum annuum L.*) en un sistema acuapónico

Artículo científico

Murcia-Meléndez, M.A.

Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Desarrollo Rural.

Alvarenga-Rivas, K.E.

Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Desarrollo Rural.

Mártir, J.E.

Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Desarrollo Rural.

Rodríguez-Urrutia, E.A.

Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Desarrollo Rural.

Vanegas-Matheu, A.C.

Ministerio de Agricultura y Ganadería, CENDEPESCA.

Rodríguez-Gracias, O.A.

Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Fitotecnia.

RESUMEN

La investigación se realizó de mayo a octubre de 2022 en el Centro de Desarrollo de la Pesca y Acuicultura (CENDEPESCA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Santa Tecla, La Libertad, El Salvador. El objetivo fue validar cuatro densidades de tilapia (*Oreochromis sp.*) y dos hortalizas, tomate (*Lycopersicum esculentum L.*) y chile dulce (*Capsicum annuum L.*), para evaluar la producción, rendimiento y relación beneficio-coste del sistema acuapónico. Se construyeron cuatro módulos acuapónicos, cada uno con un estanque para peces con capacidad de 5.04 m³, tres filtros con función mecánica y biológica, una cama de siembra con tubos de PVC para las hortalizas, una bomba de recirculación de agua y una de aireación. Se evaluaron ocho tratamientos con tres repeticiones: tomate, chile dulce, y cuatro densidades de siembra de tilapia (40, 60, 80 y 100 peces/m³). Se midieron los parámetros: peso y talla de peces, altura de plantas, número y peso de frutos por planta. Para analizar los datos se utilizó un arreglo factorial 2x4 bajo un diseño completamente al azar, un nivel de significancia del 5 %, y el programa INFOSTAT® 2020. El mayor beneficio neto se obtuvo con la densidad de 100 peces/m³, en tomate con USD112.75 y una tasa de retorno marginal de USD2.49; en chile dulce de USD119.85 y una tasa de retorno marginal de USD2.52.

Palabras Clave: acuaponía, tilapia, *Oreochromis*, tomate, *Lycopersicum esculentum L.*, chile dulce, *Capsicum annuum L.*

ABSTRACT

The research was carried out between May and October 2022 at the Center for the Development of Fisheries and Aquaculture (CENDEPESCA) of the Ministry of Agriculture and Livestock (MAG), in Santa Tecla, La Libertad, El Salvador. The objective was to validate four densities of tilapia (*Oreochromis sp.*) and two vegetables, tomato (*Lycopersicum esculentum L.*) and sweet pepper (*Capsicum annuum L.*), to evaluate the production, performance and cost-benefit ratio of the aquaponic system. Four aquaponic modules were built, each one with a fish pond with a 5.04 m³ capacity, three filters with mechanical and biological functions, a planting bed with PVC tubes for vegetables, a water recirculation pump, and an aeration pump. Eight treatments with three replicates, tomato and sweet pepper, and four stocking densities of tilapia (40, 60, 80 and 100 fish/m³) were evaluated; the following parameters were measured: weight and size of fish, height of plants, number and weight of fruits per plant. To analyze the data, a 2x4 factorial arrangement was used under a completely randomized design, a significance level of 5%, and the INFOSTAT® 2020 program. The highest net benefit was obtained with a density of 100 fish/m³, in tomato with USD112.75 dollars and a marginal rate of return of USD2.49 dollars; in sweet pepper of \$119.85 dollars and a marginal rate of return of USD2.52 dollars.

Key Words: aquaponic, tilapia, *Oreochromis*, tomato, *Lycopersicum esculentum L.*, sweet pepper, *Capsicum annuum L.*

DOI:10.5281/zenodo.10263991

 ACCESO ABIERTO

Título en inglés:

Validation of the productive performance of tilapia (*Oreochromis sp.*), tomato (*Lycopersicum esculentum L.*) and sweet pepper (*Capsicum annuum L.*) in an aquaponic system

Correspondencia:
efrain.rodriguez@ues.edu.sv

Presentado:
29 de mayo de 2023

Aceptado:
14 de agosto de 2023



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional

INTRODUCCIÓN

La acuaponía es un sistema de producción sostenible en donde se combina un cultivo acuícola, generalmente peces, y uno hidropónico, -cultivo de vegetales en el que no se emplea suelo- (Rakocy, citado por CENADAC 2011). Estos se unen en un único sistema de recirculación de flujo de agua con desechos orgánicos generados por los peces, que a la vez son convertidos a través de la acción de bacterias benéficas, de amoníaco a nitratos que funcionan como fertilizante para el crecimiento y desarrollo de los vegetales (Martínez y Albertos 2014).

En El Salvador, la acuaponía es un método inusual, ya que muchos productores y familias desconocen los beneficios que ofrece. La acuaponía es una alternativa viable para la reducción de costos, la diversificación productiva y fresca; además, consume muy pocos recursos básicos para su desarrollo (Calderón *et al.* 2019).

El uso del espacio en la acuaponía es más productivo si se compara con cultivos tradicionales donde es necesario tener grandes extensiones de tierra para producir alimentos, por lo tanto, son modelos donde se puede producir y cosechar dentro de las ciudades. La acuaponía permite cultivar en lugares cuya tierra no es apta para hacerlo, ya que no precisa de fertilizantes o químicos en la producción de los alimentos, la reutilización de los residuos que genera su actividad hace que esta nueva forma de cultivo sea el futuro de la producción de alimentos en el mundo entero (Dominguez 2013).

Los sistemas acuapónicos son modelos productivos amigables con el medioambiente, producen bienestar y desarrollo en la región donde se cultivan; gracias a este

tipo de cultivos el planeta tierra también se beneficia, porque la huella de carbono es menor a la que se genera con los modelos productivos tradicionales (Colorado y Ospina 2019).

La investigación tuvo como objetivo validar cuatro densidades de tilapia (*Oreochromis sp.*) y dos hortalizas, tomate (*Lycopersicum esculentum L.*) y chile dulce (*Capsicum annum L.*), para evaluar la producción, rendimiento y relación beneficio-costos del sistema acuapónico mediante la técnica de la película nutritiva.

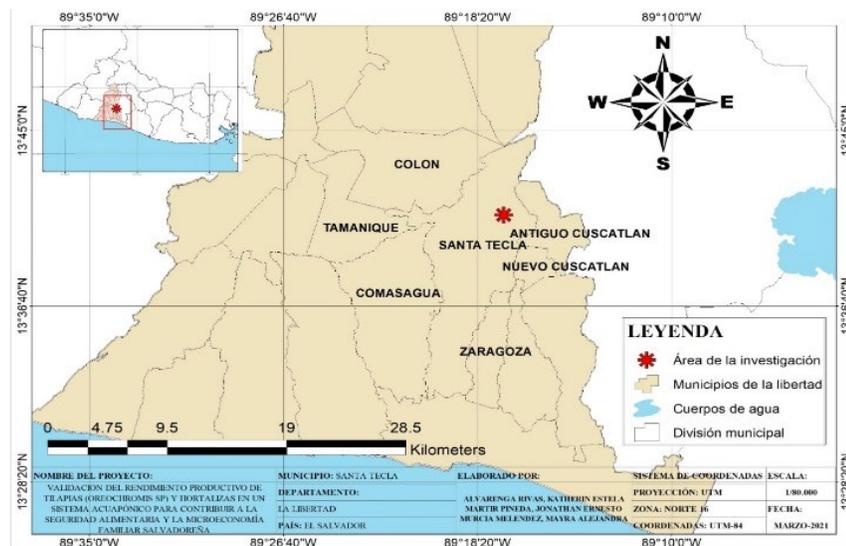
Para la realización de la investigación, se contó con el apoyo del Centro de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura (CENDEPESCA), del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de El Salvador, con la finalidad de proponer una alternativa innovadora de producción sencilla para contribuir a la microeconomía familiar y la seguridad alimentaria y nutricional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la investigación

Se realizó en el periodo de mayo a octubre de 2022 en las instalaciones del Ministerio de Agricultura y Ganadería, ubicado en Santa Tecla, departamento de La Libertad, El Salvador (Figura 1), con coordenadas geográficas Latitud 13° 41' 3", Longitud 89° 17' 12", a una altura de 789 metros sobre el nivel del mar, la temperatura máxima promedio es de 29 °C, una temperatura mínima promedio de 18 °C, precipitación media anual de 1,492 milímetros y una humedad relativa anual de 70 % (Datos tablas y gráficos mensual y anual de las condiciones climáticas en Santa Tecla El Salvador 2018).

Figura 1.
Ubicación de la investigación.



Metodología de campo

En la parte acuícola se cultivó tilapia y en la parte hidropónica, tomate variedad Tacana y chile dulce variedad Magaly R, en un sistema acuapónico bajo la técnica de la película nutritiva (NFT por sus siglas en inglés).

Diseño y construcción del sistema acuapónico

La investigación se ejecutó en una superficie de 60 m², en el cual se delimitaron y nivelaron cuatro áreas, cada una con 15 m², donde se construyó cada estanque.

El sistema acuapónico contó con los siguientes componentes físicos (Figura 2):

Componente A

Estanque para peces, con dimensiones: 3.60 m de largo, 1.40 m de ancho y 1.10 m de profundidad, con capacidad de 5.04 m³ de agua, donde se evaluaron cuatro densidades de siembra de tilapia: 40, 60, 80 y 100 peces/m³. Para la construcción de cada estanque se utilizaron pliegos de electromalla de 6 x 6 x 6 pulgadas (6 m de largo por 2.35 m de ancho) para conformar las paredes de soporte, formando un corral rectangular con postes de bambú de 1.5 m de altura para el soporte de la electromalla. Dentro del corral metálico se colocó una geomembrana de polietileno de alta densidad de 0.75 mm de espesor y grado alimenticio.

Posteriormente se colocó sobre los estanques malla sombra de polietileno de color negro al 75 % de sombra, para disminuir la incidencia del sol sobre el espejo de agua y la producción de microalgas, y evitar la caída de hojas dentro del estanque. También se colocó cobertura

de plástico de polietileno transparente para tratar de mantener las condiciones de temperatura del agua debido a que se tuvieron temperaturas de 18 °C durante la noche y madrugada.

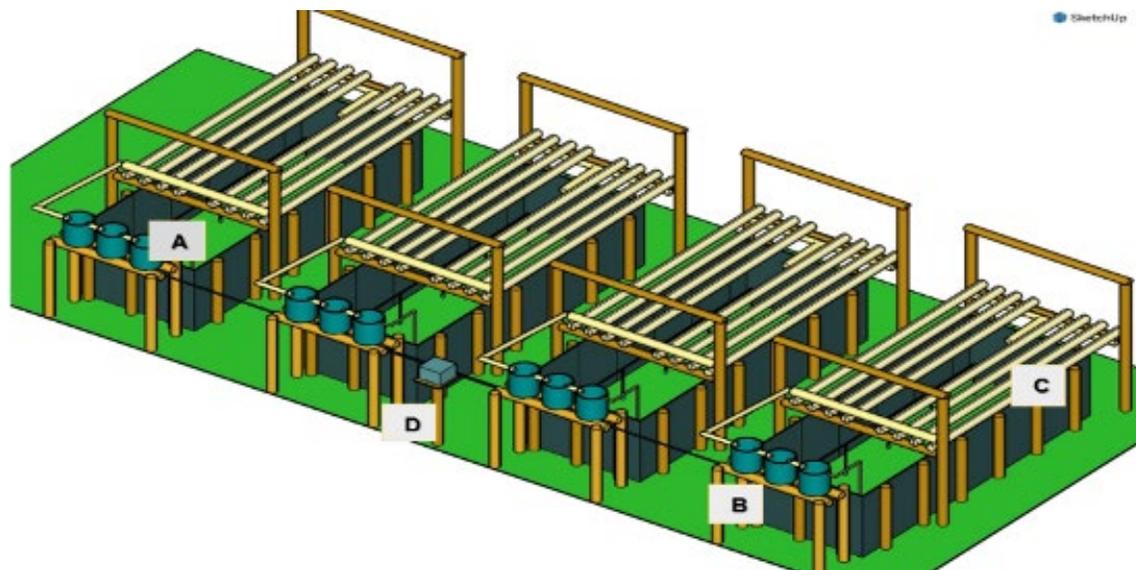
Componente B

Sistema de biofiltros: inició con la nivelación del suelo a lo ancho del estanque, luego se colocaron bloques de concreto y tubos de hierro galvanizado como vigas de soporte. Sobre las bases se colocaron tres barriles plásticos (uno con capacidad de 64 galones y los dos restantes de 36 galones) perforados en sus bases y con tuberías y llaves para realizar el drenaje de sedimentados, el sistema cumplía con la función de filtro mecánico y biológico. En la parte inferior de cada barril, los primeros 15 cm de columna de agua funcionaban como cámara sedimentadora de materia orgánica, favoreciendo el proceso de mineralización; el resto de la columna, hasta llegar al punto del drenaje superior, se llenó con material inerte biofiltrante, estos materiales fueron trozos de pajillas plásticas no biodegradable cortadas de 2 a 3 cm de longitud, bolitas de poliestireno expandible (durapax), los cuales fueron depositados en bolsas de tela de mosquitero. Sobre la bolsa se colocó escoria volcánica de color rojo para aumentar la superficie de alojamiento de bacterias nitrificantes y proporcionarle peso a la bolsa para evitar que flotara.

Los barriles eran abastecidos de agua desde el estanque por medio de una bomba sumergible, la cual llenaba el primer barril, luego el agua continuaba su curso pasando entre barriles hasta salir por el último hacia la cama de siembra.

Figura 2.

Componentes del sistema acuapónico: estanque (A), sistema de biofiltros (B), camas de siembra (C), sistema de aireación (D).



Componente C

Camas de siembra: para su construcción se utilizaron ocho tubos de PVC de 3 m de longitud y cuatro pulgadas de diámetro, a los cuales se le realizaron 15 perforaciones de 2.25 pulgadas de diámetro en línea recta a una distancia de centro a centro, de 0.20 m entre ellos, además se realizó una perforación de ½ pulgada al inicio y al final de cada tubo y se les colocaron tapones machos para luego colocar los tubos de abastecimiento y drenaje de agua. El agua viajaba a través de las tuberías alimentando a las plantas. Seguidamente cada uno fue colocado en las vigas de soporte sobre los estanques y nivelados para mantener una lámina de agua uniforme al interior. Finalmente fueron sujetos al bambú con cinchas plásticas para evitar que se movieran y perdieran su nivel.

Componente D

Sistema de recirculación y aireación: se colocó una bomba aireadora de 20 watts, al centro de los cuatro estanques, la cual se utilizó para distribuir aire por un tubo de ½ pulgada. Se colocaron cinco válvulas plásticas de control de flujo de aire por estanque, dando paso al aire a través de mangueras y piedras aireadoras colocadas al centro de los estanques. Se colocaron bombas sumergibles, Little Giant de 1/6 de HP, para aumentar la aireación en el agua de los estanques. Para llevar agua de los estanques a los barriles, se utilizó una bomba sumergible de 35.5 watts

Limpieza, llenado de estanques y siembra de alevines

Previo a la siembra de los alevines, se limpiaron y desinfectaron internamente las paredes de cada uno de los estanques con solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 5 %, y se dejó por 24 horas, posteriormente se lavaron con suficiente agua hasta quitar por completo la película de solución desinfectante; luego se procedió al llenado de cada estanque con agua potable dejándola reposar por siete días para la volatilización del cloro antes de la siembra de los alevines.

Los alevines fueron trasladados desde la Estación Acuícola de Atiocoyo a Santa Tecla en bolsas plásticas con 25 % de agua y 75 % de oxígeno puro, la siembra dio inicio con la aclimatación, dejando las bolsas de alevines flotando durante 30 minutos en el agua de cada estanque para disminuir el estrés por el choque térmico.

Para depositar los alevines en el agua, se realizó el conteo de estos en cada estanque, colocando la cantidad establecida para cada tratamiento, más 10 % por posibles mortalidades. Los alevines presentaron pesos entre 5 a 10 gramos, con un promedio de 5.41 g por individuo.

Manejo del alimento

La cantidad de alimento proporcionado se calculó mediante muestreos biométricos cada siete días; se suministró, diariamente, alimento balanceado comercial en forma de pellet, distribuido en cuatro raciones al día: por la mañana a las 9:00 a. m. y 11:00 a. m. y por la tarde a la 1:00 p. m. y 3:00 p. m. Los porcentajes de proteína utilizados fueron 38 % durante el primer mes y 32 % de proteína para los tres meses restantes.

Por problemas de falta de apetito en los peces, provocado por bajas temperaturas en el agua, se adicionó 10 g de probiótico por libra de alimento durante el primer mes y 5 g a partir del segundo mes, esto permitió a los peces, no solo, incrementar el apetito, sino la tasa de crecimiento y la resistencia a enfermedades.

Manejo de los cultivos de tomate y chile dulce

La variedad de tomate que se utilizó fue Tacana y la de chile dulce fue Magaly R, ambas son de crecimiento semideterminado. Los plantines de tomate fueron trasladados desde San Juan Opico y los de chile dulce desde Cojutepeque, en bandejas plásticas de almácigo con 22 días de edad desde su germinación.

Los plantines fueron colocados en conos fabricados de geomembrana, a los cuales se les colocó una tira de tela con el propósito de que, por capilaridad, subiera el agua a la raíz, ya que el nivel de agua dentro de los tubos era bajo con respecto a la longitud de las raíces durante las primeras semanas; seguidamente fueron ubicados sobre cada agujero de los tubos de PVC de cuatro pulgadas y se les agregó cascajo volcánico de color rojo para brindarle fijeza a cada planta. Los plantines fueron trasplantados 15 días después de haber realizado la siembra de los alevines y 15 días después se realizó el tutorado vertical de forma individual con «pita rafia», con el fin de evitar el doblamiento de las plantas y mantener un crecimiento erguido para conseguir mejor iluminación y ventilación entre plantas.

La fertilización de las plantas fue por medio de la transformación de los desechos metabólicos de los peces, convirtiendo el amonio en nitrato y de la mineralización de microelementos en el biofiltro, además, al follaje se le aplicaron fertilizantes foliares multiminerales orgánicos y estimulantes o fórmula enraizadora para mejorar el crecimiento radicular.

El control de plagas y enfermedades se realizó a través de poda de hojas, eliminación de plantas dañadas, control biológico a través de insectos depredadores como Coccinélidos, uso de repelentes orgánicos como el alcotabaco (mezcla de alcohol y tabaco) y apichi (mezcla de ajo, pimienta y chile), ambos utilizados para el control

de insectos chupadores y masticadores, y agua jabonosa para el control de áfidos.

Muestreo de peces

Los muestreos se realizaban semanalmente utilizando una atarraya para la captura de los peces, una regla graduada en centímetros y una báscula semianalítica.

El muestreo consistió en capturar 30 peces de cada estanque, se midieron desde la cabeza hasta la cola y se pesaron (Figura 3), el peso total de la muestra se dividió entre los 30 peces muestreados para obtener el peso promedio, este dato sirvió para calcular la cantidad de alimento a proporcionar a los peces a través de los porcentajes que indican las tablas de alimentación según el peso de los individuos, dichas tablas establecen el porcentaje diario de alimento para cada etapa según el peso alcanzado.

Figura 3.
Medición y pesaje de muestras de peces.



Muestreo de plantas

Los muestreos se realizaban semanalmente, se utilizó una regla graduada durante las primeras cinco semanas y luego se utilizó cinta métrica. En el momento de la cosecha de frutos se utilizó una balanza semianalítica para el pesaje y un Vernier para medición.

El muestreo consistió en medir tres plantas por tratamiento, desde la base del tallo hasta la parte más alta de la planta. La cosecha comprendió el corte y pesaje de los frutos de las plantas seleccionadas y del total de frutos por cada tratamiento.

Mantenimiento de los sistemas acuapónicos

Actividades realizadas diariamente: comprobación visual del estado de salud a través del comportamiento de los peces, retiro de peces muertos, preparación de raciones de alimento y alimentación de peces, observación de las plantas para descartar la presencia de plagas o enfermedades, control de plagas, verificación del funcionamiento de los equipos eléctricos (bombas de recirculación de agua, sistemas venturi, bombas de

aireación y piedras aireadoras), control del nivel del agua en los estanques y llenado del agua faltante, control de fugas de agua en tuberías o mangueras, verificación del flujo normal de agua y de posibles obstrucciones, toma de parámetros físicos del agua (oxígeno, saturación y temperatura).

Actividades realizadas semanalmente: recambios de agua en los estanques cada vez que se tenían niveles elevados de amonio o de turbidez, control de los parámetros físico-químicos del agua (transparencia o turbidez, nitratos, nitritos, potencial de hidrógeno, alcalinidad, dureza y amonio), aplicación de fertilizante foliar a las plantas, podas de limpieza y de formación en plantas, tutorado de plantas, limpieza de piedras aireadoras, muestreo de plantas y peces, aplicación de sal, y medicamentos para peces. La sal ayuda a contrarrestar el estrés ocasionado por el manejo durante los muestreos, para restaurar la osmorregulación, prevenir y controlar enfermedades, y para mejorar el estado general de los peces.

Actividades realizadas mensualmente: limpieza de bombas de recirculación de agua, del material filtrante, de sistemas venturi, de biofiltros y su drenaje.

Metodología de laboratorio

Para medir el oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y la temperatura del agua se utilizó un medidor de oxígeno disuelto; para medir la turbidez del agua se usó un disco secchi, el cual se sumergía verticalmente en el estanque hasta que se dejaba de observar; para medir el pH, nitratos, nitritos, dureza y alcalinidad, se utilizaron tiras de pruebas colorimétricas, las cuales se sumergían en el agua, se giraban dos veces y al sacarlas del agua se esperaba 30 segundos para su lectura. Para la prueba de amonio, se utilizaron tiras del mismo tipo, se sumergían en el agua por cinco segundos y se esperaba un minuto para su lectura.

Tabla 1.

Tratamientos evaluados en la investigación..

Factor A (hortalizas)	Factor B (densidad de siembra)	Tratamiento	Detalle del tratamiento
H1: Tomate	D1: 40 peces/m ³	Testigo relativo o Tratamiento 1 (T1)	Tomate más 40 peces/m ³ de tilapia
H1: Tomate	D2: 60 peces/m ³	Tratamiento 2 (T2)	Tomate más 60 peces/m ³ de tilapia
H1: Tomate	D3: 80 peces/m ³	Tratamiento 3 (T3)	Tomate más 80 peces/m ³ de tilapia
H1: Tomate	D4: 100 peces/m ³	Tratamiento 4 (T4)	Tomate más 100 peces/m ³ de tilapia
H2: Chile dulce	D1: 40 peces/m ³	Testigo relativo o Tratamiento 5 (T5)	Chile dulce más 40 peces/m ³ de tilapia
H2: Chile dulce	D2: 60 peces/m ³	Tratamiento 6 (T6)	Chile dulce más 60 peces/m ³ de tilapia
H2: Chile dulce	D3: 80 peces/m ³	Tratamiento 7 (T7)	Chile dulce más 80 peces/m ³ de tilapia
H2: Chile dulce	D4: 100 peces/m ³	Tratamiento 8 (T8)	Chile dulce más 100 peces/m ³ de tilapia

Para la organización, procesamiento y análisis estadístico de los datos, se utilizaron métodos descriptivos univariados como gráficas y medidas de tendencia central. A todas las variables se les aplicó análisis de varianza (ANOVA). Se utilizó la prueba estadística de Tukey (comparación múltiple de medias) para comparar las medias de los tratamientos y determinar cuál produce los mejores efectos en las variables en estudio. Todo el análisis se realizó con un nivel de significancia (alfa α) del 5 % (0.05) y mediante la utilización de hojas de cálculo de Microsoft Excel® 2016 y el programa estadístico Infostat® 2020 (Rodríguez 2021).

Presupuesto parcial

El análisis económico se elaboró mediante el presupuesto parcial y beneficios netos, el cual se realizó con la finalidad de calcular el costo beneficio de la producción de los

Metodología estadística

Para el análisis de datos se aplicó un arreglo factorial 2x4 bajo un diseño completamente al azar, esto por las condiciones controladas en los estanques (parámetros fisicoquímicos del agua) y las características similares del material experimental (alevines de tilapia de la misma edad, hortalizas de la misma variedad, fecha de siembra y trasplante).

Los tratamientos que se evaluaron en la investigación fueron ocho: combinaciones de dos hortalizas (tomate y chile dulce) y cuatro densidades de siembra de tilapia (40, 60, 80 y 100 peces/m³), con tres repeticiones (Tabla 1).

cultivos de tilapia y hortalizas (tomate y chile dulce) en cada uno de los estanques.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Talla de peces

La mayor talla promedio de los peces de tilapia se obtuvo a los 120 días después de la siembra con la densidad 2 (60 peces/m³) con 10.96 cm, seguido por la densidad 4 (100 peces/m³) con 9.91 cm, luego la densidad 1 (40 peces/m³) con 9.71 cm, y por último la densidad 3 (80 peces/m³) con 9.24 cm. Se demostró estadísticamente con probabilidad (p-valor) de 0.7465, mayor que la significancia estadística (α) = 0.05, que las densidades de siembra de 60 y 100 peces/m³ mostraron similares efectos en la talla de los peces (Tabla 2).

Tabla 2.
Medidas resumen y análisis de varianza de la talla de tilapias.

Densidad de peces/m ³	Variables	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	p-valor
D1	Talla de peces muestreo 16	16.57	1.07	6.48	0.7465
D2		17.31	2.33	13.47	
D3		16.47	1.8	10.93	
D4		17.46	2.22	12.74	

Estos resultados difieren con lo reportado por Ascencio *et al.* (2019), quienes evaluaron un modelo de acuaponía en la producción de biomasa de tilapia y lechuga en la Estación Acuícola de Santa Cruz Porrillo del Centro de Desarrollo de la Pesca y Acuicultura (CENDEPESCA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador, ubicada a 35 m. s. n. m. y con temperatura de 37 °C, obteniendo una talla promedio de 14.1 cm para una densidad de siembra de 50 peces/m³ durante 120 días; esta diferencia se atribuye a las condiciones ambientales en las que se realizó la investigación con una altitud de 789 m. s. n. m. y temperaturas de 18 a 29 °C. Saavedra (2006), afirma que los peces deben encontrarse en rangos óptimos de temperatura (25 a 32 °C) para que su crecimiento y salud no se vea afectado por la aparición de enfermedades a causa de bajas temperaturas.

Ganancia de talla de los peces

Se demostró con una probabilidad (p-valor) de 0.4540,

Tabla 3.
Medidas resumen y análisis de varianza de la ganancia de talla en las tilapias.

Densidad de peces/m ³	Variables	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	p-valor
D1	Ganancia de talla (cm)	9.71	0.66	6.81	0.4540
D2		10.96	2.18	19.92	
D3		9.24	1.99	21.49	
D4		9.91	2.19	22.12	

Tabla 4.
Medidas resumen y análisis de varianza del peso en las tilapias.

Densidad de peces/m ³	Variables	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	p-valor
D1	Peso muestreo 16	97.7	14.91	15.26	0.8177
D2		115.3	41.51	36	
D3		100.86	29.45	29.2	
D4		109.69	47.15	42.98	

mayor que la significancia estadística (α) = 0.05, que las densidades de siembra D1 (40 peces/m³), D2 (60 peces/m³), D3 (80 peces/m³) y D4 (100 peces/m³), no presentaron diferencias estadísticas significativas en la ganancia de talla de las tilapias (Tabla 3).

Peso de los peces

El mayor peso promedio de los peces de tilapia se obtuvo a los 120 días después de la siembra con la densidad 2 (60 peces/m³) con 111.18 g, seguido por la densidad 4 (100 peces/m³) con 102.81 g, luego la densidad 3 (80 peces/m³) con 95.20 g, y por último la densidad 1 (40 peces/m³) con 91.74 g. Se demostró estadísticamente con probabilidad (p-valor) de 0.8177, mayor que la significancia estadística (α) = 0.05, que las densidades de siembra de 60 y 100 peces/m³ mostraron similares efectos en el peso de los peces (Tabla 4).

Juárez (2016), evaluó parámetros biológicos de tilapia gris en un sistema acuapónico en la granja acuícola El Alevín, Veracruz, México, ubicada entre 10 - 500 m. s. n. m. con temperatura anual de 22 - 26 °C, pH 7.2 - 8.0, oxígeno disuelto 5.7 mg/L al inicio y 4.3 mg/L al final, obteniendo como resultado una ganancia de peso de 100.30 g para una densidad de siembra de 45 peces/m³ durante un periodo de 120 días; esta similitud en ganancia de peso se debe a los parámetros fisicoquímicos del agua y la temperatura en la que se realizó esta investigación que fue de 19-26 °C, pH 8.5, oxígeno disuelto 6.37 mg/L al inicio y 4.55 mg/L al final.

Baños *et al.* (2020), afirman que la ganancia de peso en los peces depende principalmente de la alimentación y del oxígeno disuelto presente en el agua.

Ganancia de peso

Se demostró con una probabilidad (p-valor) de 0.7868, mayor que la significancia (α) = 0.05, que las densidades de siembra D1 (40 peces/m³), D2 (60 peces/m³), D3 (80 peces/m³) y D4 (100 peces/m³), no presentaron diferencias estadísticas significativas en la ganancia de peso de las tilapias (Tabla 5).

Tabla 5.

Medidas resumen y análisis de varianza de la ganancia de peso en las tilapias.

Densidad de peces/m ³	Variables	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	p-valor
D1	Ganancia de peso (g)	91.74	14.33	15.62	0.7868
D2		111.18	41.51	37.34	
D3		95.2	29.94	31.45	
D4		102.81	47.31	46.02	

Tabla 6.

Medidas resumen y análisis de varianza de la altura de plantas de tomate y chile dulce, y las densidades de tilapias.

Combinación de hortalizas con densidad de peces (factor AxB)	Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	p-valor
T1: tomate con 40 peces/m ³	Ganancia de altura (cm) muestreo 12	47.17	14.51	30.77	0.0023
T2: tomate con 60 peces/m ³		35.00	5.89	16.84	
T3: tomate con 80 peces/m ³		62.5	6.38	10.21	
T4: tomate con 100 peces/m ³		82.17	8.43	10.26	
T5: chile dulce con 40 peces/m ³		39.5	6.24	15.81	
T6: chile dulce con 60 peces/m ³		33.83	10.68	31.51	
T7: chile dulce con 80 peces/m ³		37.50	6.26	16.71	
T8: chile dulce con 100 peces/m ³		38.17	6.05	15.85	

Durante la investigación las plantas de tomate presentaron deficiencias nutricionales de potasio, lo que provocó quemaduras en los bordes de las hojas, arrugamiento y encogimiento de las hojas. La deficiencia de boro ocasiona malformaciones en brotes nuevos y frutos pequeños originando bajo crecimiento y desarrollo en ambos cultivos. Las plantas de chile con deficiencia de fósforo presentaron coloración violeta en las hojas.

McCauley *et al.* (2011), afirman que la deficiencia de potasio puede reducir el crecimiento de las plantas y la deficiencia de magnesio puede causar problemas durante el proceso de fotosíntesis, provocando quemaduras en las hojas.

Graber citado por Villalobos y Gonzales (2016), menciona que el requerimiento de potasio es bajo para el desarrollo de los peces, por lo que en la dieta no se incluye, a raíz de esto, es necesario aplicar los nutrientes, requeridos para el desarrollo de las plantas, de manera foliar para que no afecte el bienestar de los peces, ya que las cantidades

demandadas de nutrientes por las hortalizas de fruto son mayores.

Número de frutos de tomate por planta

El mayor número de frutos en las plantas de tomate se obtuvo con el tratamiento 4 (100 peces/m³) con 4.11 frutos; los tratamientos 1 (40 peces/m³), tratamiento 2 (60 peces/m³) y tratamiento 3 (80 peces/m³) no produjeron.

Número de frutos de chile dulce por planta

El mayor número de frutos en las plantas de chile dulce se obtuvo con el tratamiento 6 (60 peces/m³) con 2.28 frutos, seguido por el tratamiento 5 (40 peces/m³) con 2.07 frutos, luego el tratamiento 8 (100 peces/m³) con 1.40 frutos, y por último el tratamiento 7 (80 peces/m³) con 1.0 frutos. Se demostró con una probabilidad (p-valor) de 0.0166, menor que el nivel de significancia (α) = 0.05, que el cultivo de tomate y chile dulce presentaron diferencias significativas en cuanto al número de frutos (Tabla 7).

Tabla 7. Medidas resumen y análisis de varianza del número de frutos en tomate y chile dulce, y tilapias.

Combinación de hortalizas con densidad de peces (factor AxB)	Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	p-valor
T1: tomate con 40 peces/m ³		0.00	0.00	—	
T2: tomate con 60 peces/m ³		0.00	0.00	—	
T3: tomate con 80 peces/m ³		0.00	0.00	—	
T4: tomate con 100 peces/m ³	Número de frutos	4.11	2.53	61.44	0.0166
T5: chile dulce con 40 peces/m ³		2.07	0.9	43.64	
T6: chile dulce con 60 peces/m ³		2.28	1.17	51.22	
T7: chile dulce con 80 peces/m ³		1.00	0.00	0.00	
T8: chile dulce con 100 peces/m ³		1.40	0.69	49.49	

En esta investigación no se produjeron muchos frutos de tomate y chile dulce, debido a que en las primeras semanas las raíces no tuvieron contacto directo con la lámina de agua que circulaba por los tubos de PVC, causando estrés en las plantas, lo que provocó una floración y fructificación anticipada sin que llegara a cuajar.

En esta investigación el pH del agua de los estanques se mantuvo entre 8 y 9, lo que condujo a una absorción insuficiente de nutrientes por parte de las plantas, esto ocasionó un bajo rendimiento de frutos de tomate y chile dulce, ya que estos cultivos requieren pH de 5.5 a 6.5, como lo menciona López (2019).

Leal (2017) en su estudio sobre rangos óptimos de pH para el desarrollo de tomate y tilapia en acuaponía, estableció

3 tratamientos en intervalos de pH de 6 – 7; 7 - 8; 8 - 9, mencionando que el pH de 6 - 7 se mantuvo sin diferencia estadística en el número de frutos por racimo. Los pH de 6 - 7 y de 7 – 8, fueron diferentes estadísticamente solo en el tercer racimo en rendimiento y en el primer racimo en número de frutos. El pH de 8 – 9, siempre fue el peor, respecto a los demás tratamientos.

Peso de los frutos de tomate

El mayor peso se obtuvo con el tratamiento 4 (100 peces/m³) con 134.07 g; los tratamientos 1 (40 peces/m³), tratamiento 2 (60 peces/m³) y tratamiento 3 (80 peces/m³) no produjeron.

Peso de los frutos de chile dulce

El mayor peso se obtuvo con el tratamiento 6 (60 peces/m³) con 64.12 g, seguido por el tratamiento 5 (40 peces/m³) con 55.30 g, luego el tratamiento 8 (100 peces/m³) con 32.83 g y por último el tratamiento 7 (80 peces/m³) con 32.57 g.

Se demostró con una probabilidad (p-valor) de 0.0014, menor que el nivel de significancia (α) = 0.05, que el cultivo de tomate y chile dulce presentaron diferencias estadísticas significativas en el peso de los frutos (Cuadro 8).

Juárez (2016), evaluó los parámetros biológicos de la tilapia gris al implementar un sistema acuapónico utilizando los sistemas NFT y cama con sustratos, obteniendo que las plantas de tomate y chile trasplantadas al sistema NFT, no se desarrollaron correctamente debido a que los vegetales que dan frutos requieren mayor demanda nutricional.

Diver (1996) y Villalobos y Gonzáles (2016), afirman que las plantas que producen frutos, necesitan de sistemas más complejos, ya que el agua en acuaponía no logra suplir las necesidades nutricionales para el cultivo de tomate, ya que es más demandante en cantidad de nutrientes comparados con los cultivos de hojas.

Costo beneficio del establecimiento y producción del sistema acuapónico

Para evaluar la construcción de cada módulo acuapónico se realizó un cálculo de costos de los materiales e insumos utilizados en la investigación, con el propósito de contar con una nueva alternativa de ingresos para productores

de tilapia en El Salvador. En el estanque 1 se realizó una inversión de USD 523.77, en el estanque 2 USD 528.17, estanque 3 USD 532.57 y en el estanque 4 USD 536.97, teniendo un costo total de USD 2,298.63 por los cuatro estanques. Como resultado de la investigación se demuestra que los sistemas acuapónicos son rentables, esto se atribuye principalmente al cultivo de tilapia, siendo las hortalizas un valor agregado en el sistema de producción.

En los tratamientos donde se cultivó tomate con las diferentes densidades de tilapia, el mayor beneficio neto se obtuvo con el tratamiento 4 (tomate con 100 peces/m³) con USD 112.75, y el menor beneficio neto se obtuvo con el tratamiento 1 (tomate con 40 peces/m³) con USD 31.31. En los tratamientos donde se cultivó chile dulce con las diferentes densidades de tilapia, el mayor beneficio neto se obtuvo con el tratamiento 8 (chile dulce con 100 peces/m³) con USD 119.85, y el menor beneficio neto se obtuvo con el tratamiento 5 (chile dulce con 40 peces/m³) con USD 36.12 (Figura 4).

Tasa de retorno marginal (TRMg)

Se determinó que por cada dólar que se invierte en el cultivo de tomate con una densidad de 100 peces/m³ el productor recupera el dólar invertido y obtiene USD 2.49 adicionales; es decir que el productor obtendrá una TRMg del 249.37 % de su inversión total.

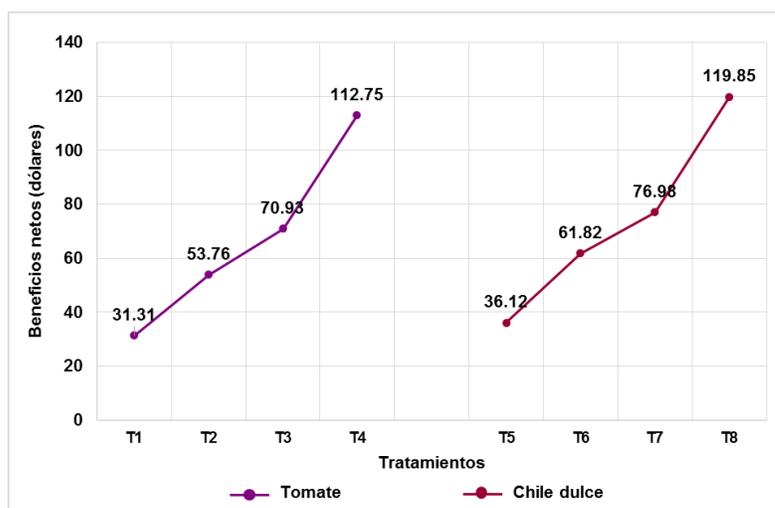
Se determinó que por cada dólar que se invierte en el cultivo de chile dulce con una densidad de 100 peces/m³ el productor recuperará el dólar invertido y obtiene USD 2.52 adicionales, es decir que el productor obtendrá una TRMg del 252.68 % de su inversión total.

Tabla 8.

Medidas resumen y análisis de varianza del peso de frutos en tomate y chile dulce, y tilapias.

Combinación de hortalizas con densidad de peces (factor AxB)	Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	p-valor
T1: tomate con 40 peces/m ³		0.00	0.00	-	
T2: tomate con 60 peces/m ³		0.00	0.00	-	
T3: tomate con 80 peces/m ³		0.00	0.00	-	
T4: tomate con 100 peces/m ³	Peso de frutos (g)	134.07	79.57	59.35	0.0014
T5: chile dulce con 40 peces/m ³		55.3	16.21	29.32	
T6: chile dulce con 60 peces/m ³		64.12	23.98	37.39	
T7: chile dulce con 80 peces/m ³		32.57	18.56	56.98	
T8: chile dulce con 100 peces/m ³		32.83	30.40	95.92	

Figura 4.
Curva de beneficios netos del cultivo de tomate y chile dulce.



CONCLUSIONES

El mayor peso de las tilapias (111.18 gramos) y la mayor talla (10.96 cm), se obtuvo con la densidad de siembra de 60 peces/m³ a los 120 días después de la siembra de los alevines.

En el tratamiento 4 (100 peces/m³), se obtuvo el mayor número de frutos de tomate (4.11 unidades), el mayor peso de los tomates (134.07 gramos) y la mayor altura de la planta de tomate (69.9 cm).

En el tratamiento 6 (60 peces/m³) se obtuvo el mayor número de frutos de chile dulce (2.28 unidades) y el mayor peso de los chiles (64.12 gramos).

El mayor beneficio neto en el cultivo de tomate y tilapia, y en el cultivo de chile dulce y tilapia se obtuvo con la densidad de 100 peces/m³, para tomate con USD 112.75 y una tasa de retorno marginal de 249.37 % o USD 2.49, y para el chile dulce de USD 119.85 y una tasa de retorno marginal de 252.68 % o USD 2.52.

Las bajas temperaturas debilitan el sistema inmunológico de las tilapias, provocando la aparición de enfermedades y reduciendo el consumo de alimento, retardando su crecimiento y desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Desarrollo de la Pesca y Acuicultura (CENDEPESCA), por financiar nuestro proyecto y confiar en nuestro trabajo y a todo el personal en el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), por su apoyo durante la fase de campo.

A la Universidad de El Salvador y a la Facultad de Ciencias

Agronómicas y a su personal docente por ser parte de este proceso de formación académica y profesional.

BIBLIOGRAFÍA

- Ascencio Quintanilla, SV; Del Valle Campos, GE; Velásquez Alfaro, GA. 2019. Evaluación de un modelo de acuaponía en la producción de biomasa de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en El Salvador (en línea). Tesis Ing. Agr. San Salvador, El Salvador, UES. Consultado 31 oct. 2022. Disponible en <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/19029/1/13101681.pdf>
- Baños Sánchez, DJ; Carrillo Galdámez, LE; López Alvarenga, CA; Portillo Pérez, CB; Sáenz Nolasco, NE. 2020. Análisis comparativo del rendimiento de la tilapia de la línea híbrido gift (*Oreochromis niloticus*) utilizando estanques sobre suelo con geomembrana blanca vs negra (en línea). Tesis Ing. Agr. San Miguel, El Salvador, UES. Consultado 01 nov. 2022. Disponible en <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/23353/1/ANALISIS%20COMPARATIVO%20DEL%20RENDIMIENTO%20DE%20TILAPIA%20EN%20ESTANQUES%20SOBRE%20SUELO.pdf>
- Calderón García, DM; Olivas García, JM; Luján Álvarez, C; Ríos Villagómez, SH; Hernández Salas, J. 2019. Factibilidad económica y financiera de un sistema de producción acuapónico de tilapia, lechuga y langostino de río en Delicias, Chihuahua, México. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 27(77):5-11. Consultado 16 mar. 2020. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7163180.pdf>
- CENADAC (Centro Nacional de Desarrollo Acuícola, Argentina). 2011. Introducción a la acuaponía (en línea). San Cosme, Argentina. Consultado 08

- mar. 2020. Disponible en <http://chilorg.chil.me/download-doc/86262>
- Colorado Gómez, MA; Ospina Correa M. 2019. La acuaponía como herramienta de formación en tiempos de paz (en línea). Bogotá, Colombia. 61 p. Consultado 22 abr. 2020. Disponible en https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5555/acuaponia_como_herramienta_de_formaci%C3%B3n.pdf?sequence=3
- Datos tablas y gráficos mensual y anual las condiciones climáticas en Santa Tecla El Salvador. 2018. (en línea, sitio web). Consultado 3 feb. 2023. Disponible en <http://hikersbay.com/climate-conditions/elsalvador/santatecla/clima-en-santa-tecla.html?lang=es>.
- Diver, S. 1996. Integración de la hidroponía con la acuicultura. Tecnología apropiada transferencia para zonas rurales y centro nacional de tecnología apropiada (en línea). ATTRA. 163(1): 1-20. Consultado 18 nov. 2022. Disponible en <https://backyardaquaponics.com/Travis/aquaponic.pdf>
- Domínguez, R. 2013. Acuaponía = Sustentabilidad Acuícola, México (en línea). Revista Divulgación Acuícola (11):11-15. Consultado 9 mar. 2021. Disponible en https://issuu.com/divulgacionacuicola/docs/revista_divulgacion_acuicola_agost
- Juárez Carballo, LE. 2016. Evaluación de los parámetros biológicos de la tilapia gris *Oreochromis niloticus* mediante la implementación de un sistema acuapónico (en línea). Tesis. M. Sc. SNP. Veracruz, México, UV. Consultado 31 oct. 2022. Disponible en <https://www.uv.mx/pozarica/egja/files/2017/05/Luis-Enrique-Juarez.pdf>
- Leal, OG. 2017. Rango de pH óptimo para el desarrollo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en acuaponía (en línea). Tesis M.Sc. Montecillo, Texcoco. Estado de México, COP. Consultado 08 nov. 2022. Disponible en http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/3983/1/Leal_Ayala_OG_MC_Edafologia_2017.pdf
- López Jaime, JA. 2019. Cultivo acuapónico: guía especializada (en línea). Málaga, España. CIFAL. Consultado 02 nov. 2022. Disponible en <https://cifalmalaga.org/web/wp-content/uploads/2020/04/2019.11.07-LIBRO-ACUAPONIA.pdf>
- Martínez Yañez, R; Albertos Alpuche, PJ. 2014. La Acuaponía como herramienta didáctica (en línea). San Cristóbal de las Casas, Chiapas. Consultado 08 mar. 2020. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/272167344_La_acuaponia_como_herramienta_didactica_para_la_ensenanza_de_la_ciencia_y_la_tecnologia
- McCauley, A; Jones, C; Jacobsen, J. 2011. Nutriente vegetal funciones y deficiencia y síntomas de toxicidad (en línea). 9:1-14. Consultado 07 nov. 2022. Disponible en <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/24770/1/T-IASA%20I-005599.pdf>
- Rodríguez Gracias, O.A. 2021. Análisis descriptivo e inferencial (entrevista). San Salvador, El Salvador.
- Saavedra Martínez, MA. 2006. Manejo del cultivo de tilapia (en línea). Managua, Nicaragua. CIDEA. Consultado 21 dic. 2019. Disponible en <https://www.crc.uri.edu/download/MANEJO-DEL-CULTIVO-DE-TILAPIA-CIDEA.pdf>
- Villalobos Reyes, S; González Pérez, E. 2016. Determinación de la relación pez planta en la producción de tomate (*Lycopersicon sculentum* L.) en sistema de acuaponía (en línea). Rev. Méx. Ciencias Agrícolas 7:983-992. Consultado 03 nov. 2022. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000500983