

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOLOGÍA EN ACUICULTURA



Efecto de la densidad de *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico con *Nasturtium officinale* “berro” en el crecimiento de ambas especies

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
BIÓLOGO ACUICULTOR

Autores

Bach. Henriquez Vasquez, Arnye Jamill

Bach. Velásquez Velásquez, Viviana Karina

Asesor

Dr. Blgo. Saldaña Rojas, Guillermo Belisario

ORCID: 0000-0003-4877-1165

Nuevo Chimbote – Perú

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOLOGÍA EN ACUICULTURA



Efecto de la densidad de *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico con *Nasturtium officinale* “berro” en el crecimiento de ambas especies

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
BIÓLOGO ACUICULTOR**

Autores

Bach. Henriquez Vasquez, Arnye Jamill

Bach. Velasquez Velasquez, Viviana Karina

Revisado y aprobado por el asesor

Dr. Blgo. Saldaña Rojas, Guillermo Belisario

ORCID: 0000 – 0003 – 4877 – 1165

Nuevo Chimbote – Perú

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOLOGÍA EN ACUICULTURA



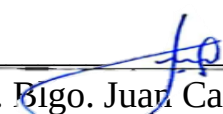
Efecto de la densidad de *Oreochromis niloticus* en un sistema
acuapónico con *Nasturtium officinale* “berro” en el crecimiento
de ambas especies

Autores

Bach. Henriquez Vasquez, Arnye Jamill

Bach. Velasquez Velasquez, Viviana Karina

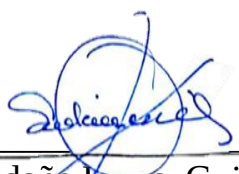
Revisado y aprobado por el jurado evaluador



Mg. Blgo. Juan Carhuapoma Garay
Presidente



Dr. Blgo. Luis Campoverde Vigo
Secretario



Dr. Blgo. Saldaña Rojas, Guillermo Belisario
Integrante

Nuevo Chimbote – Perú

2025

ACTA DE CALIFICACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En el Distrito de Nuevo Chimbote, en la Universidad Nacional de Santa, en el Laboratorio de Acuicultura Continental, siendo las 11:10 horas del día 10 de abril 2025, dando cumplimiento a la Resolución N° 084-2025-UNS, se reunió el Jurado Evaluador presidido por Juan Cortez Gory, teniendo como miembros a Luis Compuera Vicos (secretario) (a), y Guillermo Saldña Rojas (integrante), para la sustentación de tesis a fin de optar el título de Biólogo Acuicultor realizado por el, (la), (los) tesista (as)

ARNYE JAVIER HENRIQUEZ VASQUEZ, quien (es) sustentó (aron) la tesis intitulada: "Efecto de la densidad de *Dreochromis niloticus* en un sistema acuapónico con *Nasturtium officinale* "berco" en el crecimiento de ambos especies"

Terminada la sustentación, el (la), (los) tesista (as)s respondió (ieron) a las preguntas formuladas por los miembros del jurado.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como EXCELENTE, asignándole un calificativo de 19.3 puntos, según artículo 112° del Reglamento General de Grados y Títulos vigente (Resolución N° 337-2024-CU.-R-UNS).

Siendo las 12:30 horas del mismo día se dio por terminado el acto de sustentación firmando los miembros del Jurado en señal de conformidad

Nombre: Juan Cortez Gory
Presidente

Nombre: Luis Compuera Vicos
Secretario

Nombre: Guillermo Saldña Rojas
Integrante

Distribución: Integrantes J.E (), tesistas () y archivo (02).



ACTA DE CALIFICACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En el Distrito de Nuevo Chimbote, en la Universidad Nacional de Santa, en el Laboratorio de Acuicultura Continental, siendo las 11:10 horas del día 10 de abril 2025, dando cumplimiento a la Resolución N° 084-2025-UNS, se reunió el Jurado Evaluador presidido por Juan Carhuapoma Gary, teniendo como miembros a Luis Compavere Vico (secretario) (a), y Guillermo Soldano Rojas (integrante), para la sustentación de tesis a fin de optar el título de Biólogo Acuícola, realizado por el, (la), (los) tesista (as)

VIVIANA KARINA VELASQUEZ VELASQUEZ, quien (es) sustentó (aron) la tesis intitulada: Efecto de la densidad de Oreochromis niloticus en un sistema acuaponico con nastroción afinizales "bento".

Terminada la sustentación, el, (la), (los) tesista (as)s respondió (ieron) a las preguntas formuladas por los miembros del jurado.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como EXCELENTE, asignándole un calificativo de 19.3 puntos, según artículo 112° del Reglamento General de Grados y Títulos vigente (Resolución N° 337-2024-CU.-R-UNS).

Siendo las 12:30 horas del mismo día se dio por terminado el acto de sustentación firmando los miembros del Jurado en señal de conformidad

Nombre: Juan Carhuapoma Gary
Presidente

Nombre: Luis Compavere Vico
Secretario

Nombre: Guillermo Soldano Rojas
Integrante

Distribución: Integrantes J.E (), tesistas () y archivo (02).



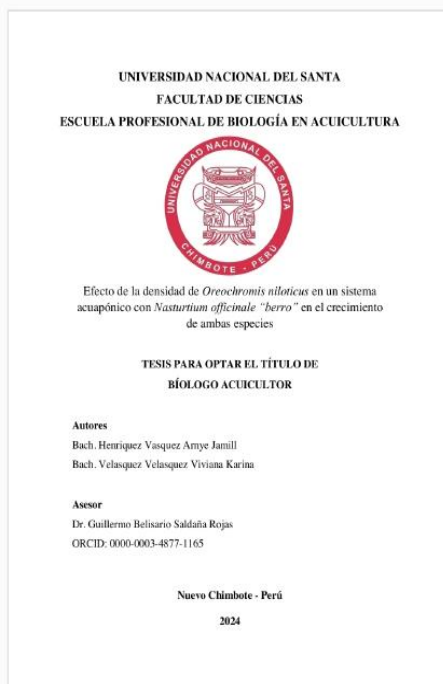


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: arnye henriquez vasquez
Título del ejercicio: TESIS VELASQUEZ - HERNIQUEZ
Título de la entrega: Efecto de la densidad de *Oreochromis niloticus* en un siste...
Nombre del archivo: FINAL_INFORME_DE_TESIS_1.pdf
Tamaño del archivo: 500.68K
Total páginas: 33
Total de palabras: 9,798
Total de caracteres: 51,810
Fecha de entrega: 04-dic.-2024 12:37p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre... 2540644299



Efecto de la densidad de *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico con *Nasturtium officinale* “berro” en el crecimiento de ambas especies

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	14%	3%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	1library.co Fuente de Internet	5%
2	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	4%
3	repositorio.unbosque.edu.co Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1%
5	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.unas.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

"No temas, porque yo estoy contigo; no te desanimes, porque yo soy tu Dios. Te fortaleceré y te ayudaré; te sostendré con mi diestra victoriosa."

(Isaías 41:10)

A Dios, quien me ha permitido llegar muy lejos y que tiene grandes planes para mí, a mis padres Olga Vasquez Garcia y Jorge Henriquez Otiniano que me apoyaron constantemente durante toda mi carrera universitaria, al igual que mi hermana Karolina Henriquez Vasquez y mi hermano Sebastian Henriquez Vasquez, quienes siempre me motivaron a seguir adelante; y a todas aquellas personas que en algún punto de mi vida me ayudaron me apoyaron y tuvieron la confianza en mi lograr esta meta.

Arnye Jamill Henriquez Vasquez

A Dios, por darme la fuerza, sabiduría y paciencia para superar cada desafío en mi camino universitario. Gracias por iluminar mi vida con su guía y por brindarme la oportunidad de alcanzar este logro. A mis padres, Banesa Velasquez Alva y Daniel Velasquez Mendieta, por su amor, apoyo y sacrificio incondicional a lo largo de toda mi vida universitaria. Gracias por estar siempre a mi lado y por creer en mí. A mi hermana Deysi Velasquez Velasquez, por su apoyo constante, sus palabras de aliento y por motivarme en todo momento. Tu presencia ha sido fundamental en este recorrido, y siempre estaré agradecida por tu amor y compañía.

Viviana Karina Velasquez Velasquez

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor, Dr. Guillermo Saldaña Rojas, agradecemos profundamente su apoyo, dedicación y compromiso a lo largo de la elaboración de esta tesis. Su orientación y comprensión fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

A todos los docentes de la Escuela Académico Profesional de Biología en Acuicultura de la Universidad Nacional del Santa, en especial al Dr. Luis Campoverde Vigo y al Mg. Juan Carhuapoma Garay, les expresamos nuestro agradecimiento por compartir sus conocimientos y valores durante nuestra formación.

A nuestras amigas Rosiisela Saavedra Bonifacio y Yanela Cancan Broncano por apoyarnos en la alimentación y cuidado de los organismos acuáticos en algunas ocasiones.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de alguna forma, contribuyeron con su apoyo moral y académico para la culminación de este trabajo, cuya colaboración fue indispensable en cada etapa del proceso.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	15
II.	MARCO TEÓRICO	18
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1.	Lugar del experimento	21
3.2.	Material experimental	21
3.2.1.	Población.....	21
3.2.2.	Muestra.....	21
3.3.	Método	21
3.3.1.	Diseño de investigación	21
3.4.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	22
3.4.1.	Transporte.....	22
3.4.2.	Aclimatación	22
3.4.3.	Selección y siembra.....	22
3.4.4.	Acondicionamiento de acuarios	22
3.4.5.	Acondicionamiento del sistema acuapónico	23
3.4.6.	Alimentación	23
3.5.	Recolección de datos.....	24
3.5.1.	Cuantificación de productos nitrogenados en el agua de cultivo	24
3.5.2.	Crecimiento de tilapia	24
3.5.3.	Biomasa en peces	24
3.5.4.	Crecimiento de berro	24
3.5.5.	Producción (P).....	25
3.5.6.	Calidad del agua.....	25
3.5.7.	Costo de producción del sistema acuapónico tilapia – berro	25
3.5.8.	Análisis estadístico	25
IV.	RESULTADOS.....	26
4.1.	Producción y relación de compuestos nitrogenados.....	26
4.2.	Crecimiento de <i>O. niloticus</i>	27
4.3.	Crecimiento de <i>N. officinale</i>	29
4.4.	Parámetros fisicoquímicos del agua	31
4.5.	Costos de producción del sistema acuapónico tilapia – berro	31
V.	DISCUSIÓN	32
VI.	CONCLUSIONES	36
VII.	RECOMENDACIONES	37
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones de amonio, nitritos y nitratos en un sistema acuapónico con diferentes densidades de <i>O. niloticus</i> .	26
Tabla 2. Parámetros de crecimiento en peso (Promedio $\pm$ desviación estándar), biomasa y producción de <i>O. niloticus</i> en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de cultivo.	27
Tabla 3. Parámetros de crecimiento en longitud (Promedio $\pm$ desviación estándar), biomasa y producción de <i>O. niloticus</i> en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de cultivo.	28
Tabla 4. Parámetros de crecimiento en peso (Promedio $\pm$ desviación estándar) y producción de <i>N. officinale</i> en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de <i>O. niloticus</i> .	29
Tabla 5. Parámetros de crecimiento en longitud (Promedio $\pm$ desviación estándar) y producción de <i>N. officinale</i> en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de <i>O. niloticus</i> .	30
Tabla 6. Parámetros físicos y químicos del agua (Media $\pm$ desviación estándar) con diferentes densidades <i>O. niloticus</i> en un sistema acuapónico.	31
Tabla 7. Costos de producción en soles (S/.) del sistema acuapónico tilapia – berro.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelado 3D del sistema acuapónico (Software: SketchUp).	23
Figura 2. Producción de compuestos nitrogenados con diferentes densidades de <i>Oreochromis niloticus</i> .	26
Figura 3. Crecimiento en peso de <i>O. niloticus</i> con diferentes densidades en cultivos acuapónicos con <i>N. officinale</i> , registrados quincenalmente.	27
Figura 4. Crecimiento en longitud de <i>O. niloticus</i> con diferentes densidades en cultivos acuapónicos con <i>N. officinale</i> , registrados quincenalmente.	28
Figura 5. Crecimiento en peso de <i>N. officinale</i> con diferentes densidades de <i>O. niloticus</i> , registrados semanalmente.	29
Figura 6. Crecimiento en longitud de <i>N. officinale</i> con diferentes densidades de <i>O. niloticus</i> , registrados semanalmente.	30

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo determinar el efecto de la densidad de *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico con *Nasturtium officinale* en el crecimiento de ambas especies. Se emplearon tres tratamientos experimentales (15, 20 y 25 peces/80 L) y un tratamiento control con 10 peces/80 L, cada uno con dos repeticiones. La investigación se realizó en el Laboratorio de Acuicultura Continental y Nutrición de Organismos Acuáticos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional del Santa, ubicada en Chimbote, Áncash. Los resultados mostraron que, si bien los peces del tratamiento con 15 peces/80 L, alcanzaron el mayor peso promedio final de $(11,34 \pm 3,29)$ y una talla promedio final de 9.0 ± 1.00 cm, fue el tratamiento de 25 peces/80 L donde se logró la mayor biomasa promedio de $0,214 \pm 0,015$ kg m⁻³, equivalente a una producción promedio de $2,68 \pm 0,15$ kg m⁻³. En berro se logró con el tratamiento de 25 peces/80 L una biomasa de $0,096 \pm 0,00$ kg m⁻² equivalente a una producción total promedio de $0,615 \pm 0,00$ kg m⁻². En ambas especies no se percató diferencias significativas con los resultados del tratamiento de 20 peces/ 80 L y 25 peces/80 L. Se concluye que el incremento en la densidad de *O. niloticus* influye en la producción de *N. officinale*.

Palabras clave: Sistema balsa flotante, tilapia, calidad del agua.

ABSTRACT

The objective of the study was to determine the effect of the density of *Oreochromis niloticus* in an aquaponic system with *Nasturtium officinale* on the growth of both species. Three experimental treatments (15, 20 and 25 fish/80 L) and a control treatment with 10 fish/80 L, each with two replicates, were used. The research was carried out at the Laboratory of Continental Aquaculture and Nutrition of Aquatic Organisms of the Faculty of Sciences of the Universidad Nacional del Santa, located in Chimbote, Ancash. The results showed that, although the fish of the 15 fish/80 L treatment reached the highest final average weight of (11.34 ± 3.29) and a final average size of 9.0 ± 1.00 cm, it was the 25 fish/80 L treatment that achieved the highest average biomass of 0.214 ± 0.015 kg m⁻³, equivalent to an average production of 2.68 ± 0.15 kg m⁻³. In watercress, a biomass of 0.096 ± 0.00 kg m⁻² was achieved with the treatment of 25 fish/80 L, equivalent to an average total production of 0.615 ± 0.00 kg m⁻². In both species, there were no significant differences with the results of the 20 fish/80 L and 25 fish/80 L treatments. It is concluded that the increase in the density of *O. niloticus* influences the production of *N. officinale*.

Key words: Floating pond system, tilapia, water quality.

I. INTRODUCCIÓN

Los piscicultores se enfrentan al reto de establecer la densidad óptima de población de peces, ya que las variaciones en esta son cruciales para el correcto funcionamiento de un sistema acuapónico (Iranian et al., 2022). La densidad poblacional es un factor crítico en la acuaponía, ya que influye en el crecimiento, alimentación, supervivencia, comportamiento, salud, calidad del agua y producción de peces (Oké & Goosen, 2019).

En acuaponía, emplear una alta densidad de peces genera una mayor cantidad de desechos, estrés y requisitos energéticos, esto conlleva a una reducción en la tasa de crecimiento absoluto y específico (Diallo et al., 2022). Por otro lado, incrementa la producción de las plantas evidenciándose en el aumento de la longitud y ancho de las hojas (Hernández et al., 2021), debido a una mayor disponibilidad de desechos ricos en nutrientes (nitrógeno y el fósforo) los cuales se convierten en formas utilizables para las plantas mediante la descomposición bacteriana (Guarnizo & Contreras, 2023).

Emplear una menor densidad de peces resulta en una mejora notable del pH, la concentración de oxígeno disuelto (OD), y una disminución significativa en la cantidad de amonio total (TAN) (Ani et al., 2022), no obstante, la cantidad de nutrientes podrían no ser suficientes para el crecimiento de las plantas, resultando en la reducción del tamaño de su tallo y hojas (Kawser et al., 2020).

La densidad de los peces desempeña un papel fundamental en los sistemas de acuaponía, ya que tiene un impacto significativo tanto en el crecimiento como en la calidad de las plantas (Maucieri et al., 2020), al emplear densidades inadecuadas pueden llevar a la subutilización del espacio y recursos de cultivo, desperdicio de alimento y a la propagación de enfermedades, resultando en pérdidas económicas y afectando el éxito de la actividad acuícola (Gonzales et al., 2021). A pesar de que se han realizado investigaciones en *C. carpio* con berro (*N. officinale*) (Irhayyim et al., 2020), aún se tiene un conocimiento limitado sobre cómo la combinación de la densidad de población influye en la optimización del rendimiento de los peces y las plantas (Mugo et al., 2024).

La integración de plantas herbáceas resulta económicamente viable para la producción de *O. niloticus*, ya que se adaptan bien a las condiciones de cultivo (Espinosa et al., 2018). Es por ello que se han realizado estudios en *O. niloticus* con romero (*Rosmarinus officinalis*), menta (*Mentha spicata*) y tomillo (*Thymus vulgaris*) (Abdel et al., 2019), debido a que dichas plantas presentan bajos requerimientos nutricionales por

lo que no se necesitan de una gran cantidad de nitrógeno para su crecimiento en acuaponía (Krastanova et al., 2022).

Es importante determinar las densidades de siembra óptimas para las especies cultivadas en sistemas acuapónicos (Maucieri et al., 2019), por ello es crucial determinar el número adecuado de peces a emplear para que las plantas puedan utilizar de manera eficiente los nutrientes disponibles (Knaus y Palm, 2017), con el fin de obtener un crecimiento adecuado y una producción sostenible para ambas especies (Nuwansi et al., 2021). Además, es indispensable emplear peces que destaquen por su adaptabilidad y su valor comercial como *O. niloticus* (Pinho et al., 2021) y plantas que presenten bajos requerimientos nutrimentales, y pueden establecerse en sistemas acuapónicos sencillos como *N. officinale* (Merino et al., 2015) cuya importancia radica en su riqueza en sales minerales (sodio, yodo, hierro, fósforo y manganeso); y vitaminas esenciales (A, C, B2 y E) (Oliveira et al., 2023).

Problema

¿Cuál es el efecto de la densidad de *O. niloticus* en un sistema acuapónico con *N. officinale* “berro” en el crecimiento de ambas especies?

Hipótesis

Si empleamos densidades de 10, 15, 20 y 25 peces/80 L de *O. niloticus*, en un sistema acuapónico con *N. officinale*, se logra mayor productividad de ambas especies con una densidad de 15 y/o 20 peces/80 L.

Objetivo general

- Evaluar el efecto de la densidad de *O. niloticus* en un sistema acuapónico con *N. officinale* “berro” en el crecimiento en ambas especies.

Objetivos específicos

- Cuantificar los productos nitrogenados producidos por *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico con *Nasturtium officinale* y su relación con el nitrato formado.
- Establecer el efecto de la densidad de *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico con *Nasturtium officinale* en el crecimiento en longitud y peso de ambas especies.

- Cuantificar los costos de producción de *Oreochromis niloticus* y *Nasturtium officinale* en un sistema de cultivo acuapónico.

II. MARCO TEÓRICO

La acuaponía consiste en la integración de hidroponía (cultivo sin suelo) y acuicultura (cultivo de organismos acuáticos), con el fin de obtener simultáneamente dos tipos de cultivos comerciales (peces y plantas) mediante la utilización conjunta de ambos sistemas (Fang et al., 2017). Transforma los residuos alimentarios de los peces en biomasa vegetal y reduce la liberación de efluentes cargados de nutrientes en el entorno natural (David et al., 2022).

Los sistemas acuapónicos representan una eficaz manera de reducir y aprovechar los residuos que se descargan en el entorno natural, ya que las plantas recuperan los nutrientes disueltos de los peces, lo que permite reducir la necesidad de cambios frecuentes de agua (Herrera et al., 2021). Resulta una alternativa eficiente a la agricultura convencional, ya que promueve una producción sostenible de alimentos, con menor contaminación y uso eficiente del agua (Gillani et al., 2022). Posibilita una producción ininterrumpida durante todo el año, dado que tanto las plantas como los peces se desarrollan en un entorno controlado, esto la convierte en una alternativa prometedora para el cultivo de frutas, verduras y productos pesqueros (van Gorcum et al., 2019).

Los sistemas de cultivo en plantas más empleados en la acuaponía son: aguas profundas (DWC) o balsa flotante, lechos absorbentes y la técnica de película de nutrientes (NFT) (Maucieri et al., 2018). El uso de lechos absorbentes con sustrato es una efectiva opción como biofiltro, lo que permite mantener la calidad del agua y gestionar los sólidos en sistemas de recirculación, incluso con alta densidad de peces (Babatunde et al., 2019). El sistema de aguas profundas incluye una plataforma flotante ubicada en un recipiente, con una red de nailon en el fondo para proteger las raíces de las plantas de posibles daños provocados por los peces (Sabwa et al., 2022). La técnica NFT consiste de tuberías de PVC unidas a una tina de plástico rectangular llena con grava de construcción (Junaid et al., 2023).

En acuaponía, el alimento de los peces es la fuente principal de nitrógeno (N) y fósforo (P) en el agua; no obstante, solo se incorpora el 30% de estos compuestos en su dieta (Moreno & Zafra, 2014), mientras que el 70% restante se convierte en aguas residuales y residuos sólidos (Yang & Kim, 2020), los cuales son aprovechados por las bacterias presentes en el sistema para luego disponerlos como una fuente de nutrientes para las plantas (Schneider et al., 2021).

Los sistemas acuapónicos utilizan filtros biológicos para mejorar la oxidación del nitrógeno amoniacal total (NAT) por medio de microorganismos (Kasozi et al., 2021). El amonio (NH_4^+) se transforma primero en nitrito (NO_2^-), por acción de las bacterias Nitrosomonas, y luego en nitrato (NO_3^-), por bacterias Nitrobacter (Heise et al., 2021), este último es absorbido por las plantas para la síntesis de aminoácidos (Riaño et al., 2019).

Tilapia nilótica (*O. niloticus*), se caracteriza por ser fácil de criar, tiene la capacidad de crecer rápidamente y demuestra una notable tolerancia a las variaciones en la calidad del agua; lo que la hace una opción atractiva en la acuicultura (Saufie et al., 2020), prospera en sistemas de recirculación y puede soportar cambios en las condiciones del agua (pH, temperatura, oxígeno disuelto y nitrógeno amoniacal total) (Wongkiew et al., 2017); es influenciada de manera positiva por la acuaponía, en el incremento de su peso corporal final, biomasa, tasa de crecimiento específica y longitud total (Siringi et al., 2021).

En acuaponía se cultivan comúnmente hortalizas de hoja verde (lechuga, acelga y col rizada), vegetales frutales (tomates, pepinos y calabacines) hierbas aromáticas (albahaca, menta y cilantro) y plantas ornamentales o medicinales (clavel, gerbera y berro) (Suárez et al., 2022). Berro de agua (*N. officinale*) es apropiada para su producción en estos sistemas, ya que demuestra un notable aumento en el crecimiento de sus hojas y una mejora en su perfil nutricional (Qian et al., 2022) y destaca por sus elevadas concentraciones de fitonutrientes, que no solo le otorgan su distintivo sabor picante, sino que también se reconocen por aportar beneficios significativos para la salud (Voutsina et al., 2016).

Los cultivos integrados de peces y vegetales como *O. niloticus* y *Lactuca sativa* (Navarro et al., 2021), *Misgurnus anguillicaudatus* y *Oenanthe Javanica* (Xia et al., 2023) así como *Monopterus albus* y *N. officinale* se realizan a distintas densidades poblacionales, para evaluar el crecimiento y supervivencia de ambas especies (Nhan et al., 2019).

En sistemas acuapónicos de menor escala con *O. niloticus* y *Lactuca sativa* se comprobó que al emplear 20 peces/105 L junto con 14 plantas/sistema, se logra obtener un crecimiento significativo para ambas especies (Hussein et al., 2020). Por otro lado,

empleando *C. carpio* y orégano *Oreganum vulgare* se obtuvieron mejores resultados al emplear 13 peces/80 L con 8 plantas/sistema (Ramirez et al., 2011).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar del experimento

La experimentación se realizó en el Laboratorio de Acuicultura Continental y Nutrición de Organismos Acuáticos, Facultad Ciencias de la Universidad Nacional del Santa (Chimbote, Áncash).

3.2. Material experimental

3.2.1. Población

Los alevines de *O. niloticus* fueron abastecidos por el centro de cultivo FISH & AQUACULTURE ubicado en Moyobamba (San Martín-Perú).

Las semillas de *N. officinale* fueron adquiridas por la empresa HIDROPÓNICA S.A.C. ubicado en La Molina (Lima-Perú).

3.2.2. Muestra

La muestra de *O. niloticus* estuvo constituida por 140 alevines de 2.5 ± 0.10 cm de longitud total y 1.0 ± 0.03 g de peso, seleccionados al azar del lote de 1000 ejemplares.

La muestra de *N. officinale* estuvo conformada por 64 plántulas de 4.5 ± 0.20 cm y 1.0 ± 0.02 g, seleccionadas al azar de un conjunto 100 ejemplares obtenidas de un almácigo.

3.3. Método

3.3.1. Diseño de investigación

El diseño fue de estímulo creciente, se emplearon cuatro tratamientos (tres experimentales y un control) con dos repeticiones, como se demuestra a continuación:

T0: Densidad 10 peces/80 L y densidad de 8 plantas/sistema acuapónico.

T1: Densidad 15 peces/80 L y densidad de 8 plantas/sistema acuapónico.

T2: Densidad 20 peces/80 L y densidad de 8 plantas/sistema acuapónico.

T3: Densidad 25 peces/80 L y densidad de 8 plantas/sistema acuapónico.

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.4.1. Transporte

Los alevines de *O. niloticus* se transportaron en bolsas de polietileno con oxígeno comprimido e introducidos en baldes de plástico (20 L), cuya densidad fue de 250 alevines/balde. El transporte fue vía terrestre y tuvo una duración de 21 h de Moyobamba a Trujillo y 2 h de Trujillo a Chimbote.

Las semillas de *N. officinale* fueron transportadas en un sobre metalizado, el transporte tuvo una duración de 8 h de Lima a Chimbote.

3.4.2. Aclimatación

Los alevines de *O. niloticus* fueron aclimatados durante una semana en un tanque de fibra de vidrio de 1000 litros, equipado con dos difusores para la oxigenación, tres termostatos para mantener la temperatura del agua a 28 °C, y se les suministró alimento balanceado con un contenido del 40 % de proteína. Cada tres días se realizaron recambios del 30% del agua, y se evacuaron los restos de alimento y de heces mediante sifoneo.

Las semillas de berro se sembraron en una bandeja germinadora (60 cm de largo y 30 cm de ancho), utilizando humus como sustrato. El proceso de germinación tuvo una duración de 7 días.

3.4.3. Selección y siembra

Finalizada la aclimatación, se seleccionaron 140 alevines los cuales fueron asignados de manera aleatoria a cada acuario en función de la densidad requerida para cada tratamiento (10, 15, 20 y 25 peces/80 L).

Las 64 plántulas fueron elegidas en función de su óptimo estado de hojas, tallos y raíces, y su siembra se realizó de manera aleatoria con una densidad de 8 plantas por sistema de balsa flotante para cada tratamiento.

3.4.4. Acondicionamiento de acuarios

Se acondicionaron ocho acuarios (0,60 m de largo, 0,38 m de ancho, 0,46 m de alto y volumen efectivo de 80 L) a los cuales se instaló un termostato de 100 Watts, una bomba sumergible, dos piedras difusoras y un filtro biológico (2 L), el cual estuvo compuesto por una capa de espuma de

poliuretano (1 cm de espesor), una capa intermedia de grava y la capa final de conchuelas (Caló, 2011), el cual se ubicó a 1 m de altura de cada acuario y se conectó a la bomba sumergible y sistema hidropónico a través de tubos de $\frac{1}{2}$ ".

3.4.5. Acondicionamiento del sistema acuapónico

El sistema de balsa flotante consistió de una caja de plástico (0.30 m de largo, 0.25 m de ancho y 0.14 m de alto) con una pieza de tecnopor (con perforaciones cada 0.10 m) compuesta por ocho agujeros en los cuales se colocarían macetas hidropónicas con esponjas, que sirvieron como soporte para colocar las plantas. La caja presentó un tubo de $\frac{1}{2}$ " ubicado en la parte posterior para la descarga del agua hacia el acuario. Este sistema operó con un flujo de agua de 100-150 L/h.

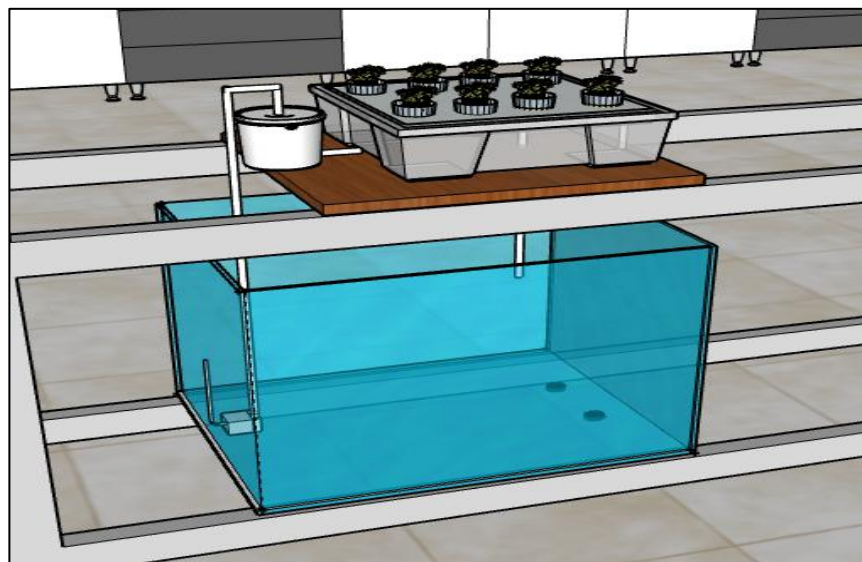


Figura 1. Modelado 3D del sistema acuapónico (Software: SketchUp)

3.4.6. Alimentación

Los alevines fueron alimentados durante 30 días con una dieta comercial AQUATECH (45% de proteína) el cual fue adquirido de ACUAFARM, ubicado en Nuevo Chimbote, Ancash. La cantidad de alimento se ajustó semanalmente según el peso promedio de los organismos, proporcionándoles alimentación a saciedad. El proceso de alimentación se llevó a cabo de forma manual, distribuyendo tres raciones diarias a las 8:00, 13:00 y 17:00 horas.

3.5. Recolección de datos

3.5.1. Cuantificación de productos nitrogenados en el agua de cultivo

Se realizó la medición de los niveles de amonio-amoniaco ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$, mg L^{-1}), nitrito (NO_2^- -N, mg L^{-1}) y nitrato (NO_3^- -N, mg L^{-1}) en el agua, tanto en el punto de entrada como en el de salida del sistema acuapónico. Para ello, se empleó un kit de análisis colorimétrico Sera, con una precisión de $\pm 0.01 \text{ mg L}^{-1}$, garantizando resultados confiables en cada medición.

3.5.2. Crecimiento de tilapia

Los peces fueron evaluados cada 15 días. El peso total (g) se determinó con una balanza digital ADAM AQT 600 ($\pm 0.01 \text{ g}$) y la longitud total (cm) con una regla graduada ($\pm 1 \text{ mm}$). Con los datos obtenidos se estableció el crecimiento absoluto (CA), la ganancia porcentual (GP), la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y la tasa de crecimiento específica (TCE), según Shete et al. (2016).

$$\text{CA} = X_2 - X_1$$

$$\text{GP (\%)} = (\text{CA}/X_1) \times 100$$

$$\text{TCA} = \text{CA}/t_2 - t_1$$

$$\text{TCE (\% día}^{-1}\text{)} = [\ln X_2 - \ln X_1] / t_2 - t_1 \times 100$$

Donde X_1 y X_2 = peso húmedo (g) o la longitud total (cm), inicial y final; t_1 y t_2 = duración en días; $\ln X_1$ y $\ln X_2$ = logaritmo natural del peso o la longitud inicial y final.

3.5.3. Biomasa en peces

$$\text{Biomasa (Kg)} = \text{Peso promedio} \times \text{Número de peces}$$

3.5.4. Crecimiento de berro

La biometría del berro se realizó cada siete días, al registrar la longitud del tallo mediante el uso de una regla graduada en cm ($\pm 0.1 \text{ mm}$) y el peso mediante una balanza digital de ($\pm 0.01 \text{ g}$) de sensibilidad. Con los datos obtenidos se calculó la tasa de crecimiento en longitud y peso de las plantas, según Shete et al. (2016).

$$\text{TCA (cm día}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{Longitud o peso final} - \text{Longitud o peso inicial})}{(\text{Tiempo final} - \text{Tiempo inicial})}$$

$$\text{TCE (\% día}^{-1}\text{)} = \left(\frac{(\text{Ln (Longitud o peso final)} - \text{Ln (Longitud o peso inicial)})}{(\text{Tiempo final} - \text{Tiempo inicial})} \right) \times 100$$

3.5.5. Producción (P)

$P \text{ (kg m}^{-2}\text{)} = \text{Biomasa} / \text{área de cultivo en los berros}$

$P \text{ (kg m}^{-3}\text{)} = \text{Biomasa} / \text{volumen de cultivo en los peces}$

3.5.6. Calidad del agua

Los parámetros de la calidad del agua se evaluaron cada siete días. La temperatura, el oxígeno disuelto y pH se analizaron con un multiparámetro Hanna Instruments (± 0.01 unidades) HI9829 – SOLITEC.

3.5.7. Costo de producción del sistema acuapónico tilapia – berro

El cálculo se realizó considerando la proyección del costo de producción por kilogramo tanto de *Oreochromis niloticus* como de *Nasturtium officinale* para cada uno de los tratamientos propuestos. Se incluyeron los costos asociados a los alevines y su alimentación en el caso de la tilapia nilótica, así como el costo de las semillas en el caso del berro. Además, se tomaron en cuenta todos los materiales empleados en la construcción del sistema acuapónico para ambas especies.

3.5.8. Análisis estadístico

La normalidad de los datos se determinó con la prueba de Shapiro–Wilk. Las diferencias entre las medias de los tratamientos se determinaron al 95 % por análisis de varianza simple y con la prueba de Tukey al 5%, el análisis se realizó con el programa estadístico SPSS versión 23 para Windows.

IV. RESULTADOS

4.1. Producción y relación de compuestos nitrogenados

Los resultados mostraron una relación directa entre las concentraciones de amonio y nitratos en el sistema acuapónico, ya que, al incrementarse los niveles de amonio, también aumentan los de nitratos. Tanto las concentraciones de amonio como de nitratos aumentaron conforme a la densidad de peces, alcanzando los valores más altos en el tratamiento con 25 peces/80 L, con $0.50 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$ de amonio y $25.98 \pm 3.88 \text{ mg L}^{-1}$ de nitratos (Tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones de amonio, nitritos y nitratos en un sistema acuapónico con diferentes densidades de *Oreochromis niloticus*

Densidad	Amonio (mg L^{-1})	Nitritos (mg L^{-1})	Nitratos (mg L^{-1})
10 peces/80 L	0.13 ± 0.05^a	0.08 ± 0.03^a	15.40 ± 2.45^a
15 peces/80 L	0.23 ± 0.05^b	0.13 ± 0.05^a	19.08 ± 2.90^a
20 peces/80 L	0.40 ± 0.08^{ab}	0.13 ± 0.05^a	20.97 ± 3.99^{ab}
25 peces/80 L	0.50 ± 0.08^b	0.15 ± 0.06^a	25.98 ± 3.88^b

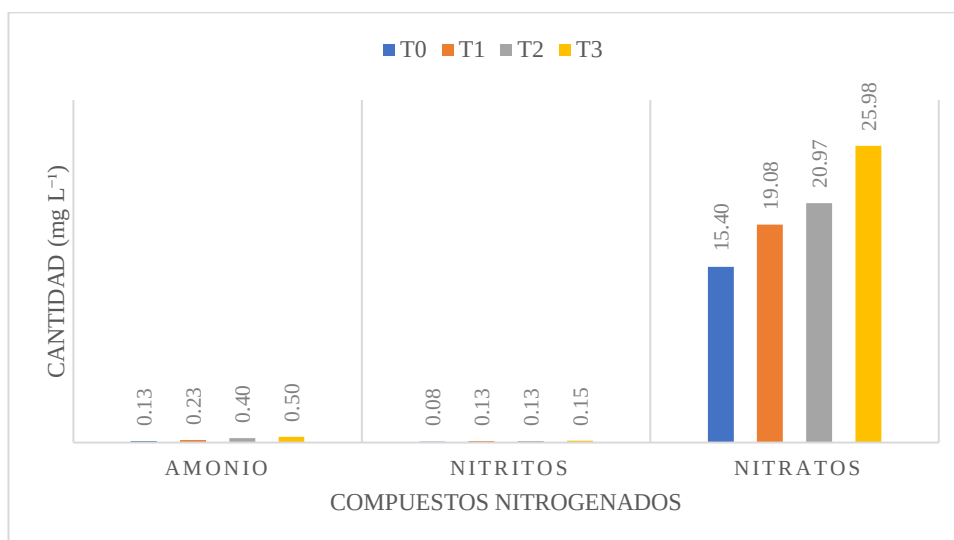


Figura 2. Producción de compuestos nitrogenados con diferentes densidades de *Oreochromis niloticus*.

Este patrón indica que la mayor producción de amonio, derivada de una mayor densidad de peces, se convierte de manera eficiente en nitratos a través del proceso de nitrificación. La relación entre ambos compuestos refleja la capacidad del sistema para gestionar el amonio generado por los peces y transformarlo en una forma aprovechable por las plantas, lo que favorece el ciclo de nutrientes dentro del sistema acuapónico (Figura 1).

4.2. Crecimiento de *O. niloticus*

El peso individual final promedio fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el tratamiento con 15 peces/80 L (11.34 ± 3.29 g), mientras que los tratamientos con 10, 20 y 25 peces/80 L mostraron valores más bajos y similares entre sí. La tasa de crecimiento absoluto (TCA) también fue mayor en el tratamiento con 15 peces/80 L (0.36 ± 0.11 g/día), en comparación con los otros tratamientos, que tuvieron valores menores y sin diferencias significativas entre ellos (Figura 1, Tabla 1).

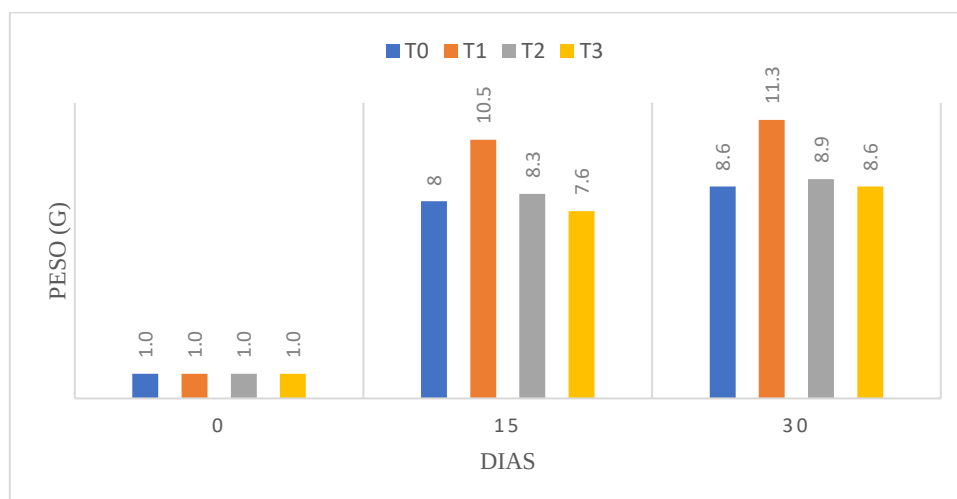


Figura 3. Crecimiento en peso de *O. niloticus* con diferentes densidades en cultivos acuapónicos con *N. officinale*, registrados quincenalmente.

Tabla 2. Parámetros de crecimiento en peso (Promedio $\pm$ desviación estándar), biomasa y producción de *O. niloticus* en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de cultivo.

Parámetros	Densidad de cultivo			
	10 peces/80 L	15 peces/80 L	20 peces/80 L	25 peces/80 L
Peso inicial (g)	1.03 ± 0.07^a	1.04 ± 0.08^a	1.00 ± 0.02^a	1.02 ± 0.07^a
Peso final (g)	8.63 ± 1.30^a	11.34 ± 3.29^b	8.91 ± 3.56^{ab}	8.57 ± 3.12^a
CA (g)	7.60 ± 1.34^a	10.30 ± 3.31^b	7.92 ± 3.58^{ab}	7.55 ± 3.13^a
TCA (g día ⁻¹)	0.26 ± 0.05^a	0.36 ± 0.11^b	0.27 ± 0.12^{ab}	0.26 ± 0.11^a
GP (%)	748.5 ± 157.0^a	1000.7 ± 344.5^b	800.1 ± 378.3^a	747.2 ± 316.1^a
TCE (% día ⁻¹)	7.07 ± 0.68^a	7.81 ± 1.18^{ab}	7.02 ± 1.55^a	6.88 ± 1.31^a
Biomasa (Kg)	0.086 ± 0.00^a	0.170 ± 0.03^{ab}	0.178 ± 0.02^b	0.214 ± 0.01^b
P (kg m ⁻³)	1.08 ± 0.02^a	2.13 ± 0.31^{ab}	2.23 ± 0.26^b	2.68 ± 0.15^b

CA: Crecimiento absoluto. GP: Ganancia porcentual. TCA: Tasa de crecimiento absoluta. TCE: Tasa de crecimiento específica. P: Producción. Datos con letras diferentes en superíndices en una fila indica diferencia significativa ($p < 0.05$).

Debemos hacer notar que, si bien el crecimiento individual promedio fue mayor en el tratamiento de 15 peces/80 L, se logró una mayor biomasa y producción en los tratamientos de 20 y 25 peces/80 L (Tabla 2).

La longitud individual promedio total y la tasa de crecimiento absoluto (TCA) fueron ligeramente mayores en el tratamiento con 15 peces/80 L. Además, este tratamiento mostró la mayor ganancia porcentual (GP) y tasa de crecimiento específico (TCE), indicando un mejor rendimiento de crecimiento en comparación con los demás tratamientos (Figura 2, Tabla 2).

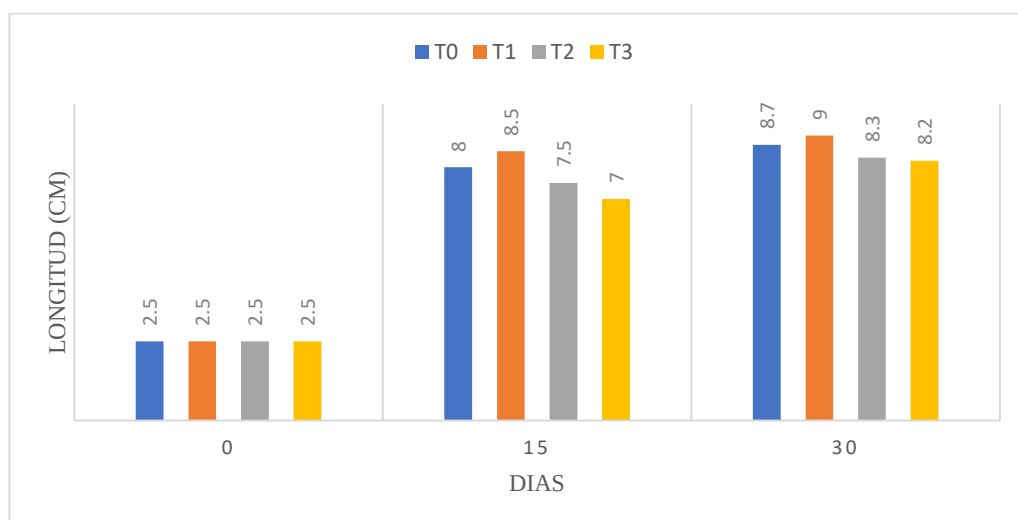


Figura 4. Crecimiento en longitud de *O. niloticus* con diferentes densidades en cultivos acuapónicos con *N. officinale*, registrados quincenalmente.

Tabla 3. Parámetros de crecimiento en longitud (Promedio $\pm$ desviación estándar), biomasa y producción de *O. niloticus* en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de cultivo.

Parámetros	Densidad de cultivo			
	10 peces/80 L	15 peces/80 L	20 peces/80 L	25 peces/80 L
Lt inicial (g)	2.50 $\pm$ 0.10 ^a	2.50 $\pm$ 0.10 ^a	2.50 $\pm$ 0.10 ^a	2.50 $\pm$ 0.10 ^a
Lt final (g)	8.6 $\pm$ 0.50 ^a	9.0 $\pm$ 1.00 ^a	8.3 $\pm$ 1.00 ^a	8.2 $\pm$ 1.50 ^a
CA (g)	6.16 $\pm$ 0.47 ^a	6.49 $\pm$ 1.02 ^a	5.84 $\pm$ 1.05 ^{ab}	5.72 $\pm$ 1.50 ^b
TCA (g)	0.21 $\pm$ 0.02 ^a	0.22 $\pm$ 0.03 ^a	0.20 $\pm$ 0.04 ^a	0.20 $\pm$ 0.05 ^a
GP (%)	246.50 $\pm$ 18.88 ^a	259.60 $\pm$ 40.89 ^a	233.60 $\pm$ 41.90 ^a	228.64 $\pm$ 59.99 ^a
TCE (% día ⁻¹)	4.14 $\pm$ 0.19 ^a	4.24 $\pm$ 0.39 ^a	3.99 $\pm$ 0.44 ^b	3.91 $\pm$ 0.60 ^b

LT: Longitud total. TCA: Tasa de crecimiento absoluta. TCE: Tasa de crecimiento específica. P: Producción. Datos con letras diferentes en superíndices en una fila indica diferencia significativa ($p < 0.05$).

4.3. Crecimiento de *N. officinale*

El peso final y la TCA fueron mayores en el tratamiento con 25 peces/80 L, mientras que la TCE fue más alta en las densidades de 15 y 25 peces/80 L. La producción (P) aumentó con la densidad, alcanzando su valor máximo en 25 peces/80 L, sin embargo, no se observaron diferencias significativas con el tratamiento de 20 peces/80 L (Figura 3, Tabla 3).

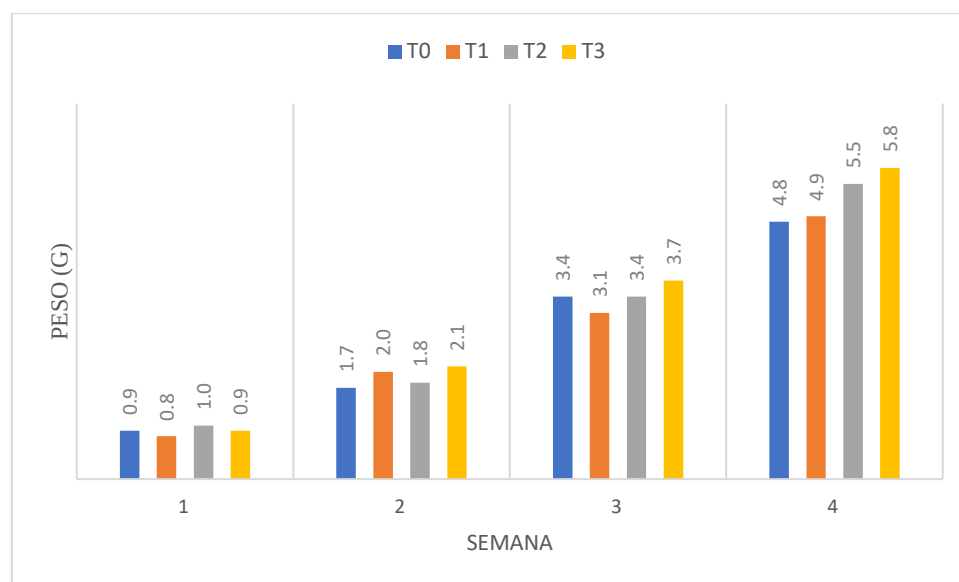


Figura 5. Crecimiento en peso de *N. officinale* con diferentes densidades de *O. niloticus*, registrados semanalmente.

Tabla 4. Parámetros de crecimiento en peso (Promedio $\pm$ desviación estándar) y producción de *N. officinale* en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de *O. niloticus*.

Parámetros	Densidad de cultivo			
	10 peces/80 L	15 peces/80 L	20 peces/80 L	25 peces/80 L
Peso inicial (g)	0.90 $\pm$ 0.19 ^a	0.84 $\pm$ 0.46 ^a	1.00 $\pm$ 0.13 ^a	0.89 $\pm$ 0.26 ^a
Peso final (g)	4.80 $\pm$ 0.29 ^a	4.94 $\pm$ 0.21 ^a	5.48 $\pm$ 0.32 ^b	5.76 $\pm$ 0.39 ^b
TCA (g)	0.13 $\pm$ 0.01 ^a	0.14 $\pm$ 0.02 ^a	0.15 $\pm$ 0.01 ^b	0.17 $\pm$ 0.02 ^b
TCE (% día ⁻¹)	5.64 $\pm$ 0.75 ^a	6.67 $\pm$ 2.59 ^b	5.69 $\pm$ 0.45 ^a	6.36 $\pm$ 0.99 ^b
Biomasa	0.038 $\pm$ 0.00 ^a	0.040 $\pm$ 0.00 ^{ab}	0.044 $\pm$ 0.00 ^b	0.046 $\pm$ 0.00 ^b
P (kg m ⁻²)	0.512 $\pm$ 0.00 ^a	0.527 $\pm$ 0.00 ^a	0.584 $\pm$ 0.00 ^b	0.615 $\pm$ 0.00 ^b

LT: Longitud total. TCA: Tasa de crecimiento absoluta. TCE: Tasa de crecimiento específica. P: Producción. Datos con letras diferentes en superíndices en una fila indica diferencia significativa ($p < 0.05$).

La talla final fue mayor en los tratamientos con 25 y 20 peces/80 L (16.37 ± 0.55 cm y 16.22 ± 0.40 cm, respectivamente), mientras que los tratamientos con 10 y 15 peces/80 L presentaron tallas ligeramente menores. La tasa de crecimiento absoluto

(TCA) y la tasa de crecimiento específico (TCE) fueron más altas en los tratamientos con 25 y 20 peces/80 L, lo que indica un mejor crecimiento en las densidades más altas (Figura 4, Tabla 4).

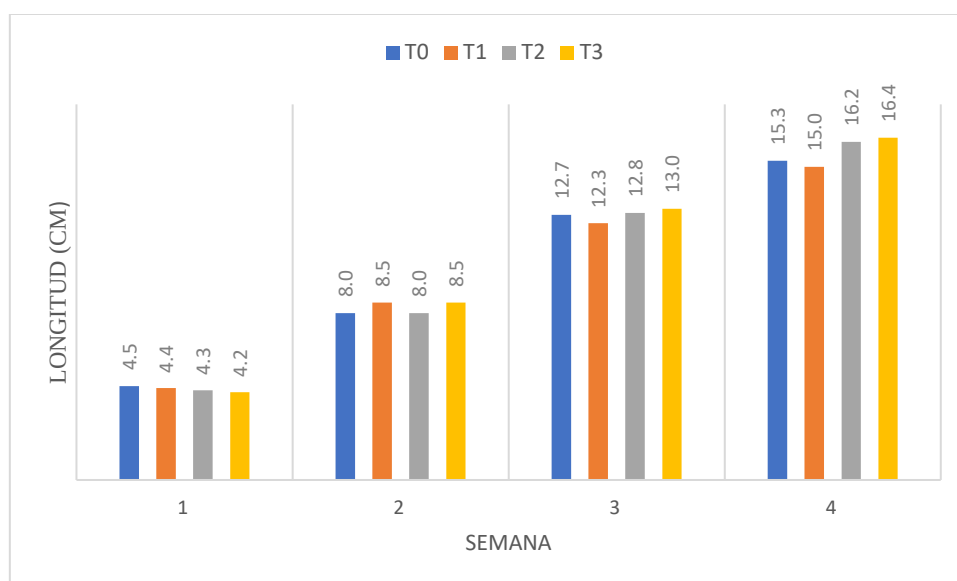


Figura 6. Crecimiento en longitud de *N. officinale* con diferentes densidades de *O. niloticus*, registrados semanalmente.

Tabla 5. Parámetros de crecimiento en longitud (Promedio $\pm$ desviación estándar) y producción de *N. officinale* en un sistema acuapónico bajo distintas densidades de *O. niloticus*.

Parámetros	Densidad de cultivo			
	10 peces/80 L	15 peces/80 L	20 peces/80 L	25 peces/80 L
Talla inicial (cm)	4.46 $\pm$ 0.21 ^a	4.41 $\pm$ 0.27 ^a	4.32 $\pm$ 0.12 ^a	4.23 $\pm$ 0.12 ^a
Talla final (cm)	15.34 $\pm$ 0.36 ^a	15.10 $\pm$ 0.23 ^{ab}	16.22 $\pm$ 0.40 ^b	16.37 $\pm$ 0.55 ^b
TCA (g)	0.38 $\pm$ 0.02 ^a	0.37 $\pm$ 0.01 ^{ab}	0.41 $\pm$ 0.01 ^b	0.42 $\pm$ 0.02 ^b
TCE (% día ⁻¹)	4.12 $\pm$ 0.20 ^a	4.11 $\pm$ 0.23 ^{ab}	4.41 $\pm$ 0.13 ^b	4.51 $\pm$ 0.17 ^b

LT: Longitud total. TCA: Tasa de crecimiento absoluta. TCE: Tasa de crecimiento específica. Datos con letras diferentes en superíndices en una fila indica diferencia significativa ($p < 0.05$).

4.4. Parámetros fisicoquímicos del agua

Los parámetros fisicoquímicos del agua mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en amonio y nitratos. La concentración de amonio fue mayor en 20 y 25 peces, y los nitratos alcanzaron su máximo en 25 peces. El oxígeno se mantuvo constante en todas las densidades, con valores alrededor de 6.0-6.6 mg L⁻¹. La temperatura y el pH no presentaron diferencias significativas.

Tabla 6. Parámetros físicos y químicos del agua (Media $\pm$ desviación estándar) con diferentes densidades *O. niloticus* en un sistema acuapónico.

Densidad	Temperatura °C	Oxígeno (mg L ⁻¹)	pH
10 peces/80 L	26.0 $\pm$ 0.5 ^a	6.6 $\pm$ 0.9 ^a	7.5 $\pm$ 0.3 ^a
15 peces/80 L	25.6 $\pm$ 0.9 ^a	6.3 $\pm$ 3.2 ^a	7.3 $\pm$ 0.1 ^{ab}
20 peces/80 L	26.2 $\pm$ 0.5 ^a	6.2 $\pm$ 1.1 ^a	7.6 $\pm$ 0.4 ^a
25 peces/80 L	25.6 $\pm$ 1.2 ^a	6.0 $\pm$ 1.4 ^a	7.5 $\pm$ 0.3 ^a

Datos con letras diferentes en superíndices en una fila indica diferencia significativa ($p < 0.05$).

4.5. Costos de producción del sistema acuapónico tilapia – berro

Los costos asumidos (Tabla 7) fueron calculados en base a una escala de laboratorio, las cuales proyectadas a una escala piloto y comercial pueden disminuir.

Tabla 7. Costos de producción en soles (S/.) del sistema acuapónico tilapia – berro

Tratamiento	Costo tilapia (S/.)		Costo berro	Costo del sistema acuapónico	Biomasa (g)		Costo estimado por tratamiento
	Alevines	Alimento	Semillas		Tilapia	Berro	
10 peces/80L	5.0	15.0	5.0	426	86.0	38.4	451.0
15 peces/80L	7.5	20.0	5.0	426	170.0	40.0	458.5
20 peces/80L	10.0	25.0	5.0	426	178.0	44.0	466.0
25 peces/80L	12.5	30.0	5.0	426	214.0	46.0	473.5

En los costos del sistema se consideraron los acuarios, mangueras, piedras difusoras, llaves de regulación, tubos, codos, recipientes de plástico, macetas hidropónicas, bidones de agua y el costo de servicio del blower (aireador), incluyendo luz y agua utilizada.

El incremento estimado en los costos entre tratamientos fue de 1,66%, lo cual no resulta significativo en comparación con el aumento observado en la producción de tilapia y berro en el tratamiento 3 (25 peces/80 L). En este tratamiento, se registró un aumento en la biomasa del 1,48% para la tilapia y del 19,8% para el berro. En general, se evidencia un crecimiento progresivo en los resultados de biomasa al comparar el tratamiento control con el de mayor densidad (25 peces/80 L).

V. DISCUSIÓN

El sistema acuapónico funciona utilizando los desechos producidos por los peces, como el amonio, transformándolo en nitritos y luego en nitratos, como fuente de nutrientes para las plantas (Schneider et al., 2021). Sin embargo, una alta concentración de amonio puede disminuir el crecimiento, el apetito y la capacidad digestiva de los peces (Effendi et al., 2017), por lo que es necesario mantenerlo por debajo de 1.0 mg L^{-1} (Soliman et al., 2023). En este estudio, los niveles de amonio fueron bajos, oscilando entre 0.1 y 0.5 mg L^{-1} .

Los productos nitrogenados fueron incrementándose con el aumento de la densidad de los peces (Tabla 1), esto puede explicar los mayores pesos y tallas individuales en peces encontrados en la densidad de 15 peces/80 L (Tabla 2), donde aún la concentración de amonio es baja (Tabla 1) comparada a la encontrada en 25 peces/80 L donde es 3-8 veces mayor. Podemos observar que la conversión de amonio a nitritos y nitratos tiene una correlación directa, lográndose altas concentraciones de nitratos, principalmente nutriente en plantas, en el tratamiento de 25 peces/80 L, siendo 1,68 veces mayor que en tratamiento control y 1,36 veces mayor que el tratamiento de 15 peces/80 L, correlacionada a la mayor biomasa de berros encontrada en los tratamientos de 20 y 25 peces/80 L (Tabla 4). Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Rahmatullah et al. (2010), quienes identificaron que la concentración de productos nitrogenados incrementó a medida que se incrementó la densidad de los peces.

Los nitritos son compuestos intermedios en el proceso de nitrificación, que convierte el amoníaco en nitratos, cuya acumulación resulta tóxica en los peces al inducir la formación de metahemoglobina, por lo que se recomienda mantener su concentración por debajo de 1 mg L^{-1} para asegurar una producción óptima (Timmons et al., 2009). Con respecto a nuestros resultados, los niveles de nitritos muestran poca variación entre las diferentes densidades de peces, estando por debajo de 1 mg L^{-1} ya que su concentración depende principalmente de la actividad de las bacterias nitrificantes del sistema acuapónico.

El nitrato, en concentraciones moderadas, es relativamente inocuo para los peces y no representa un riesgo para la salud, a excepción de niveles superiores a 90 mg L^{-1} (Stone & Thomforde, 2004). En contraste, para las plantas, se considera que el nivel óptimo de nitratos para un crecimiento máximo es de $26,3 \text{ mg L}^{-1}$ (Rakocy et al., 2012). En nuestra

experimentación, la concentración de nitratos en el agua de todos los tratamientos se mantuvo bajo (entre 15 y 25 mg L⁻¹) (Tabla 1), siendo comparable a los resultados obtenidos por Campos et al. (2013), quienes reportaron un rango de 0,10 a 24,60 mg L⁻¹ en su investigación de efluentes acuapónicos.

La absorción de nutrientes por las plantas está condicionada por el pH, ya que cuando este no es óptimo, los nutrientes pueden acumularse en el agua (Suárez et al., 2022). Para que el proceso de nitrificación funcione correctamente en un sistema acuapónico, es esencial que el pH se mantenga cerca de 7.0 (Yildiz & Bekcan, 2017). En el estudio, el pH del agua osciló entre 7.3 y 7.5, siendo comparable entre los distintos tratamientos ($p > 0.05$), lo que permitió asegurar tanto la supervivencia como el crecimiento adecuado de las dos especies.

El crecimiento en longitud y peso (Tabla 2 y 3), de los peces fue más significativo en el tratamiento 1 (15 peces/80 L), que correspondía a una de las densidades más bajas. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Vargas et al. (2021), quienes observaron que esta densidad no solo produjo el mayor peso final, sino también el más alto Tasa de Crecimiento Específica (TCE) y Ganancia Porcentual (GP). Por otro lado, Ani et al. (2022) indican en su estudio de acuaponía con tilapia y lechuga que una menor densidad poblacional favorece tanto un mayor peso promedio como una longitud final más elevada de los peces, concordando así con nuestros resultados.

Respecto al desarrollo de las plantas (Tabla 4 y 5), en el tratamiento 2, (20 peces/80 L), se evidenció un crecimiento superior en longitud y peso en comparación con los tratamientos 0 y 1. Este hallazgo coincide con lo reportado por Hussein et al. (2020), quienes emplearon la misma densidad y concluyeron que es óptima para la producción de plantas y peces en sistemas acuapónicos de recirculación. Según su estudio, esta densidad permite una mayor disponibilidad de nutrientes y condiciones óptimas del agua, lo que favorece el crecimiento de lechuga y tilapia. Sin embargo, nuestros resultados sugieren que densidades más altas pueden impulsar aún más el crecimiento de las plantas, ya que, el tratamiento 3 (25 peces/80 L), demostró un crecimiento notablemente mayor en comparación con los demás tratamientos, corroborados en los resultados en biomasa y producción encontrados, (Tabla 2 y Tabla 4) tanto para tilapia como para berro siendo mayores en los tratamientos con densidades más altas (20 y 25 peces/80 L). Este resultado se alinea con los hallazgos de Sabwa et al. (2022), quienes observaron que la biomasa vegetal, así como el ancho y la longitud de las hojas y la altura de la planta, aumentan con

el incremento en la densidad de peces. Este fenómeno se atribuye a la mayor liberación de nutrientes, especialmente nitratos, provenientes de la excreción de los peces y de los restos de alimento.

En cuanto a la longitud del tallo de las plantas, nuestros resultados fueron inferiores a los reportados por Arpazi y Castañón Rivera (2024), quienes obtuvieron tallos de *N. officinalis* entre 21.05 y 24.50 cm en un sistema acuapónico con *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris). La principal diferencia radica en que ellos utilizaron estacas para la siembra, mientras que en nuestro experimento las plantas fueron germinadas. Es relevante señalar que, en otro estudio, realizado por Nhan et al. (2019), en un sistema acuapónico con *Monopterus albus* (anguila del pantano) y *N. officinalis* utilizando el método de germinación, se obtuvieron resultados similares a los nuestros, con tallos entre 13,00 y 15,67 cm.

En relación a los costos de producción del sistema acuapónico tilapia–berro, se determinó que los gastos más significativos corresponden a los materiales y equipos necesarios para la construcción del sistema (Tabla 7). Esto coincide con lo señalado por Tokunaga et al., (2015), quien afirma que este tipo de sistema enfrenta varias limitaciones importantes, como la alta inversión inicial requerida, el consumo elevado de electricidad y a las fluctuaciones en los precios de producción. Por otro lado, podemos afirmar que la experimentación es viable puesto que los resultados permitieron identificar la densidad óptima de peces y plantas, abriendo la posibilidad de escalar el sistema, con el fin de generar mayores ingresos económicos. Sunny et al., (2019) sostiene que una vez seleccionadas las especies y la densidad adecuada se obtiene un retorno de la inversión del 100% en un periodo de 80 días ya que la cosecha de una pequeña cantidad de peces o vegetales para el consumo doméstico o la venta es muy fácil, y solo se necesita un seguimiento diario limitado para el trabajo de alimentación y mantenimiento.

Los parámetros fisicoquímicos del agua (Tabla 6), se mantuvieron dentro de los rangos recomendados para su cultivo en sistemas acuapónicos, por ende, favorecieron el desarrollo tanto de tilapia nilótica como de berro. Este hecho también se observó en *Rhamdia quelen* (bagre negro) cultivado en un sistema acuapónico junto con *Nasturtium officinalis*, donde se registró una alta tasa de crecimiento específico, un pH del agua superior a 7.3 y bajas concentraciones de amoníaco total y nitritos (Araújo, 2015). Estos resultados están relacionados con la eficacia de las bacterias del ciclo del nitrógeno,

combinada con la utilización de nitratos por parte de las plantas, lo que mejora la calidad del agua y promueve el crecimiento en ambas especies.

Para el cultivo de *Oreochromis niloticus*, se aconseja mantener entre 28 °C y 32 °C, con un mínimo de 23 °C (Tsang & Quintanilla, 2008). Por otro lado, en sistemas acuapónicos, la temperatura adecuada para el desarrollo de plantas herbáceas varía entre 20.0 °C y 31.5 °C (Campos et al., 2013). En el presente estudio, se observó que la temperatura del agua fue similar ($p>0.05$) entre los diferentes tratamientos, oscilando entre 25 °C y 26 °C. Estas condiciones permitieron que ambas especies se desarrollarán sin mostrar deficiencias en su crecimiento.

VI. CONCLUSIONES

La producción de productos nitrogenados fue significativamente mayor en los tratamientos con 20 y 25 peces/80 L, con valores de 0.40 ± 0.08 mg/L y 0.50 ± 0.08 mg/L, respectivamente, lo que resultó en altos niveles de nitratos, alcanzando un máximo de 25.98 ± 3.88 mg L⁻¹ en el tratamiento con 25 peces/80 L.

El tratamiento de 15 peces/80 L presentó el mejor rendimiento promedio individual en términos de crecimiento en peso, alcanzando un peso final significativamente mayor (11.34 ± 3.29 g) en comparación con otras densidades ($p < 0.05$).

La mayor biomasa promedio con *O. niloticus* se obtuvo en los tratamientos de 20 peces/80 L ($0,178 \pm 0,2$ kg) y 25 peces/80 L ($0,214 \pm 0,01$ kg), equivalente a la producción de $2,23 \pm 0,26$ kg m⁻³ respectivamente.

La mayor biomasa promedio de *N. officinale* se obtuvo en el tratamiento de 20 peces/80 L ($0,044 \pm 0,00$ kg) y 25 peces/80 L ($0,046 \pm 0,00$ kg) equivalente a la producción de $0,584 \pm 0,00$ kg m⁻² respectivamente, estando relacionada directamente al incremento de la densidad de los peces.

Los costos del sistema acuapónico aumentaron con la densidad agregada, con un incremento en la biomasa y producción de los tratamientos.

El estudio determinó que la densidad de tilapia en sistemas acuapónicos influye significativamente en el rendimiento, mayores densidades mejoran el crecimiento de las plantas al incrementar los nutrientes disponibles, mientras que densidades menores favorecen el desarrollo óptimo de los peces. El sistema demostró capacidad para mantener parámetros adecuados en todos los tratamientos, confirmando su viabilidad como alternativa productiva sostenible.

VII. RECOMENDACIONES

Utilizar luz solar en lugar de luz artificial para promover el crecimiento de las plantas, lo que no solo reducirá los costos de producción, sino que también puede generar mejores resultados.

Desarrollar una investigación previa sobre el tipo de plantas a emplear en acuaponía, ya que cada especie tiene diferentes requerimientos nutricionales, con el fin de optimizar el sistema y escalar a un nivel mayor en futuras aplicaciones.

Realizar un monitoreo continuo de la calidad del agua para asegurar que se mantengan los parámetros adecuados para el desarrollo óptimo de las especies involucradas.

Investigar sobre el tipo de sistema acuapónico mejor adaptado para las especies de peces y plantas que se van a cultivar.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel, M.M.; Awad, Y.M.; Abdallah, Y.A.; Radwan, S.M. Effects of Four Medicinal Plants on the Bioeconomic Analysis and Water-Use Efficiency of Nile Tilapia, *Oreochromis Niloticus* Fry Nursed under a Small-Scale Aquaponics System. AACL Bioflux 2019, 12, 851–866.
- Ani, J. S., Manyala, J. O., Masese, F. O., & Fitzsimmons, K. (2022). Effect of stocking density on growth performance of monosex Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the aquaponic system integrated with lettuce (*Lactuca sativa*). Aquaculture and Fisheries, 7(3), 328-335. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.03.002>
- Araújo A. F. (2015). Integração de plantas com espécies nativas de peixes em sistema de aquaponia. Master dissertation. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil.
- Arpazi, I. A., & Castañón Rivera, V. A. (2024). Producción del berro (*Nasturtium officinale*) en cuatro niveles de altura verticales bajo un sistema acuapónico. Cibum Scientia, 3(1), 81–89. <https://doi.org/10.53287/xroc6998eb87j>
- Babatunde, T. A., Ibrahim, K., Abdulkarim, B., Wagini, N. H., & Usman, S. A. (2019). Co-production and biomass yield of amaranthus (*Amaranthus hybridus*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) in gravel-based substrate filter aquaponic. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 8(s1), 255–261. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00297-5>
- Caló, P. (2011). Introducción a la acuaponía. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola-CENADAC. Argentina. Disponible en: <http://chilorg.chil.me/download-doc/86262>
- Campos, R., López, A., Avalos, D. A., Asiain, A., & Reta, J. L. (2013). Caracterización fisicoquímica de un efluente salobre de tilapia en acuaponia. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5, 939–950.
- David, L. H., Pinho, S. M., Agostinho, F., Costa, J. I., Portella, M. C., Keesman, K. J., & Garcia, F. (2022). Sustainability of urban aquaponics farms: An emergy point of view. Journal of Cleaner Production, 331(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129896>

- Diallo, F. L., Ly, M. A., Diop, L., Diatta, I., & Seck, S. M. (2022). Growth response of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) stocked at different densities in the LAKE-Kalassane basin in northwestern Senegal. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16(5), 1919–1928. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v16i5.9>
- Effendi, H., Wahyuningsih, S., & Wardiatno, Y. (2017). The use of nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation wastewater for the production of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. longifolia) in water recirculation system. *Applied Water Science*, 7(6), 3055–3063. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0418-z>
- Espinosa, A., Alvarez, A., Albertos, P., Guzman, R., & Martínez, R. (2018). Growth and development of herbaceous plants in aquaponic systems. *Acta Universitaria*, 28(2), 1–8. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1387>
- Fang, Y., Hu, Z., Zou, Y., Zhang, J., Zhu, Z., Zhang, J., & Nie, L. (2017). Improving nitrogen utilization efficiency of aquaponics by introducing algal-bacterial consortia. *Bioresource Technology*, 245, 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.116>
- Gillani, S. A., Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). Review on Energy Efficient Artificial Illumination in Aquaponics. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2(February), 100015. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100015>
- González, A. O., González, L., Comolli, J. A., Santinón, J. J., Agüero, C., & Roux, J. (2021). Parámetros Productivos de dos Especies de Peces Autóctonos (*Piaractus mesopotamicus* y *Prochilodus lineatus*) en un Sistema Acuapónico con Lechuga (*Lactuca sativa* sp). *Agrotecnia*, (31), 43–55. <https://doi.org/10.30972/agr.0315815>
- Guarnizo, N. A., & Contreras, A. E. Y. (2023). Acuaponía Urbana: Fomentando La Agricultura Sostenible En Entornos Urbanos. *Revista Nodo*, 18(35), 20–29. <https://doi.org/10.54104/nodo.v18n35.1616>
- Heise, J., Müller, H., Probst, A. J., & Meckenstock, R. U. (2021). Ammonium Removal in Aquaponics Indicates Participation of Comammox Nitrospira. *Current Microbiology*, 78(3), 894–903. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02358-3>
- Hernández, R., Neri, E., Astudillo, C., Delgado, R., Rivera, P., González, P., & Vázquez, M. de la L. (2021). Producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) Irrigada con efluentes

- de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico. *Industry and Higher Education*, 3(1), 1689–1699. <http://journal.unilak.ac.id/index.php/JIEB/article/view/3845%0Ahttp://dspace.uc.ac.id/handle/123456789/1288>
- Herrera, M., Colorado, M. A., Lancheros, J. A., López, I. D., Buitrago, R. A., & Reynolds, J. (2021). Sistemas Acuapónicos Como Fuente De Alimento Con La Implementación De Nuevas Tecnologías. *Revista Internacional de Pedagogía e Innovación Educativa*, 2(1), 245–256. <https://doi.org/10.51660/ripie.v2i1.77>
- Hussein, M., ELzayat, A., & Bauomi, M. (2020). Study of the effects of different monosex Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings densities on Lettuce (*Lactuca sativa*) and water quality in a low-tech recirculation aquaponic system. *International Journal of Development*, 9(1), 9–21. <https://doi.org/10.21608/ijdev.2020.145716>
- Iranian, K., Arthana, I. W., & Kartika, G. R. A. (2022). Growth of Tilapia Cultivated in Aquaponic Systems with Different Stocking Densities. *Indonesian Journal Of Aquaculture Medium*, 2(1), 46–53. <https://doi.org/10.29303/mediaakuakultur.v2i1.1378>
- Irhayyim, T., Fehér, M., Lelesz, J., Bercsényi, M., & Bársony, P. (2020). Nutrient Removal Efficiency and Growth of Watercress (*Nasturtium officinale*) under Different Harvesting Regimes in Integrated Recirculating Aquaponic Systems for Rearing Common Carp (*Cyprinus carpio* L.). <https://doi.org/10.3390/w12051419>
- Junaid, A. A., Kamarudin, M. S., Junaid, Q. O., Edaroyati, W. P., Isyaka, M. S., Dauda, A. B., Umar, D. M., Igoli, J. O., & Amin, S. M. N. (2023). Nutrient uptake and recovery potentials of *Ocimum basilicum* and *Corchorus olitorius* in a polyculture aquaponic system. *Scientific African*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01645>
- Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2021). The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. *Annals of Microbiology*, 71(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01613-5>
- Kawser, A. Q. M. R., Hossain, M. A., & Yeasmin, M. F. (2020). Optimizing the planting

- density of lettuce (*Lactuca sativa*) with tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a recirculation aquaponic system. *American Journal of Agricultural Science, Engineering, and Technology*, 4(1), 1–12. <https://doi.org/10.54536/ajaset.v4i1.41>
- Knaus, U. & Palm, H. (2017). Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture*, 466:51-63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.025>
- Krastanova, M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova, S., Yarkov, D., & Orozova, P. (2022). Aquaponic systems: biological and technological parameters. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 36(1), 305-316. <https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2074892>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Zanin, G., Birolo, M., Trocino, A., Sambo, P., Borin, M., & Xiccato, G. (2019). Effect of stocking density of fish on water quality and growth performance of European Carp and leafy vegetables in a low-tech aquaponic system. *PLoS ONE*, 14(5), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217561>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Zanin, G., Xiccato, G., Borin, M., & Sambo, P. (2020). Composition and quality traits of vegetables grown in a low-tech aquaponic system at different fish stocking densities. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11), 4310–4318. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10475>
- Merino, F. G., López, N. O., Téllez, L. T., Páez, R. S., Marcial, E. S., & Ortiz, J. S. (2015). Aquaponics: sustainable and potential alternative for food production in Mexico. *Revista Agroproductividad*, 8(3), 6.
- Moreno, E. W., & Zafra, A. (2014). Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa*), con efluentes de cultivo de tilapia. *Rebiol*, 34(2), 60–72. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/faccbiol/article/view/770>
- Mugo, J., Manyala, J. O., Muchiri, M., & Matolla, G. (2024). Effects of stocking density and water flow rate on performance, water quality and economic benefits of African catfish larvae (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) in the aquaponic system integrated with Azolla fern. *Aquaculture*, 579, 740170.

<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740170>

- Navarro, R. D., Ramos, B., Correa, S., Crispim Hundley, G., & Kodama, G. (2021). Growth of fingerlings in different stocking densities in tropical aquaponic system of basil production. *Ciência e Natura*, 43, e95. <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/2179460X63222>
- Nhan, H. T., Tai, N. T., Liem, P. T., Ut, V. N., & Ako, H. (2019). Effects of different stocking densities on growth performance of Asian swamp *Monopterus albus*, water quality and plant growth of watercress *Nasturtium officinale* in an aquaponic recirculating system. *Aquaculture*, 503, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.067>
- Nuwansi, K. K. T., Verma, A. K., Chandrakant, M. H., Prabhath, G. P. W. A., & Peter, R. M. (2021). Optimization of stocking density of koi carp (*Cyprinus carpio* var. *koi*) with gotukola (*Centella asiatica*) in an aquaponic system using phytoremediated aquaculture wastewater. *Aquaculture*, 532(September 2020), 735993. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735993>
- Oké, V., & Goosen, N. J. (2019). The effect of stocking density on profitability of African catfish (*Clarias gariepinus*) culture in extensive pond systems. *Aquaculture*, 507, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.04.043>
- Oliveira, D. R., Oliveira, W. C. De, Silva, A. O., Bezerra, B. G. M. C., Sousa, G. G. De, & Lacerda, C. F. De. (2023). Hydroponic watercress production through fish farming water reuse and varied nutrient solution recirculation times. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 27, 919–926. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n12p919-926>
- Pinho, S. M., David, L. H., Garcia, F., Keesman, K. J., Portella, M. C., & Goddek, S. (2021). South American fish species suitable for aquaponics: a review. *Aquaculture International*, 29(4), 1427–1449. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00674-w>
- Qian, Y., Hibbert, L. E., Milner, S., Katz, E., Kliebenstein, D. J., & Taylor, G. (2022). Improved yield and health benefits of watercress grown in an indoor vertical farm. *Scientia Horticulturae*, 300(December 2021), 111068. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111068>
- Rahmatullah, R., Das, M., & Rahmatullah, S. M. (2010). Suitable stocking density of

- tilapia in an aquaponic system. *Bangladesh Journal of Fisheries Research*, 14(1–2), 29–35.
- Rakocy, J. E. (2012). *Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture. Aquaculture Production Systems*, 344–386. doi:10.1002/9781118250105.ch14
- Ramirez, L., Perez, T. M. M., Jimenez, P., Hurtado, G. H., & Gómez-ramírez, E. (2011). Preliminary Assessment of Aquaponic and Hydroponic Systems in Raft. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 7(2), 242–259.
- Riaño, E. R., Caicedo, L., Torres, A., Hurtado, H., & Gómez, E. (2019). Cambios en los niveles de nutrientes en solución hidropónica de espinaca baby (*Spinacia oleracea* L.), para su futura aplicación en acuapónia Changes. <https://doi.org/https://doi.org/10.22579/20112629.544>
- Sabwa, J. A., Manyala, J. O., Masese, F. O., Fitzsimmons, K., Achieng, A. O., & Munguti, J. M. (2022). Effects of stocking density on the performance of lettuce (*Lactuca sativa*) in small-scale lettuce-Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) aquaponic system . *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 2(6), 458–469. <https://doi.org/10.1002/aff2.71>
- Saufie, S., Estim, A., Shaleh, S. R. M., & Mustafa, S. (2020). Production efficiency of green beans integrated with tilapia in a circular farming system of media-filled aquaponics. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(3), 1–11. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020183-16038>
- Schneider, P., Rochell, V., Plat, K., & Jaworski, A. (2021). Circular Approaches in Small-Scale Food Production. *Circular Economy and Sustainability*, 1(4), 1231–1255. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00129-7>
- Shete, A.P., Verma, A.K., Chadha, N.K., Prakash, C., Peter, R.M., Ashmad, I. (2016). Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with common carp (*Cyprinus carpio*) and mit (*Mentha arvensis*). *Aquaculture Engineering*, 72: 53-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.04.004>
- Siringi, J. O., Turoop, L., & Njonge, F. (2021). Growth and biochemical response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to spirulina (*Arthrospira platensis*) enhanced aquaponic system. *Aquaculture*, 544(June), 737134. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737134>

- Soliman, H., Osman, A., Abbass, M., & Badrey, A. (2023). Paired Production of the Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and Lettuce (*Lactuca sativa*) within an Aquaponics System in Sohag Governorate. *Sohag Journal of Sciences*, 8(1), 35–40. <https://doi.org/10.21608/sjsoci.2022.165767.1037>
- Stone, N.M., Thomforde, H.K. (2004). understanding your fish pond water analysis report, cooperative extension program. University of Arkansas at Pine Bluff, United States Departament of Agriculture, pp. 1-4. Disponible en: <https://fisheries.tamu.edu/files/2013/09/Understanding-Your-Fish-Pond-WaterAnalysis-Report.pdf>
- Suárez, G., Fernández, V., Lobillo, J., & Pérez, L. (2022). Characterisation of aquaponic producers and small-scale facilities in Spain and Latin America. *Aquaculture International*, 30(2), 517–532. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00793-4>
- Sunny, A. R., Islam, M. M., Rahman, M., Miah, M. Y., Mostafiz, M., Islam, N., Hossain, M. Z., Chowdhury, M. A., Islam, M. A., & Keus, H. J. (2019). Cost effective aquaponics for food security and income of farming households in coastal Bangladesh. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45(1), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.01.003>
- Timmons, M., Ebeling, J., Piedrahita, R., Hevia, M., Parada, G., y Labatut, R. (2009). *Acuicultura en Sistemas de Recirculación*. Ithaca, NY: Cayuga Aqua Ventures Llc
- Tokunaga, K., Tamaru, C., Ako, H., Leung, P., 2015. Economics of small-scale commercial aquaponics in hawai'i. *J. World Aquac. Soc.* 46, 20–32. <https://doi.org/10.1111/jwas.12173>
- Tsang, S. Y Quintanilla, M. (2008). Manual sobre producción de tilapia. CENDEPESCA. <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/mag/documents/119824/download>
- van Gorcum, B., Goddek, S., & Keesman, K. J. (2019). Gaining market insights for aquaponically produced vegetables in Kenya. *Aquaculture International*, 27(5), 1231–1237. <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00379-1>
- Vargas, R., Ríos, A., Arjona, M., Grajales, J., Guerra, R., & Guerra, I. (2021). Evaluation of zootechnical performance parameters and animal welfare in nile tilapia juveniles in a recirculation system. *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 4, 72–88. https://revistas.up.ac.pa/index.php/investigaciones_agropecuarias/article/view/251

- Voutsina, N., Payne, A. C., Hancock, R. D., Clarkson, G. J. J., Rothwell, S. D., Chapman, M. A., & Taylor, G. (2016). Characterization of the watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.; Brassicaceae) transcriptome using RNASeq and identification of candidate genes for important phytonutrient traits linked to human health
- Wongkiew, S., Popp, B. N., Kim, H. J., & Khanal, S. K. (2017). Fate of nitrogen in floating-raft aquaponic systems using natural abundance nitrogen isotopic compositions. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 125, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.08.006>
- Xia, M., Li, X., Yang, J., Li, G., Zhao, X., & Hou, H. (2023). Cress-loach coculture for improving the utilization efficiency of biogas slurry in aquaponic systems. *Environmental Technology and Innovation*, 32(7), 103328. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103328>
- Yang, T., & Kim, H. (2020). Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. *Journal of Cleaner Production*, 122619. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122619>
- Yildiz, H. Y., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-a review. *Water* 9: 13.