

Aplicación Biotecnológica de Biosólidos de Camarón Blanco (*Penaeus vannamei*) y Tilapia Roja (*Oreochromis* sp.) como Agentes de Biofertilización en la Producción de Pepino (*Cucumis sativus*)

Biotechnological Application of Biosolids from White Shrimp (*Penaeus vannamei*) and Red Tilapia (*Oreochromis* sp.) as Biofertilization Agents in Cucumber (*Cucumis sativus*) Production

José Gabriel Ortega-Villamar¹ , Ana Ruth Álvarez-Sánchez^{2†}  y
Alejandra Soto-Estrada³ 

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Maestría en Acuicultura; (J.G.O.V.). ² Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas; (A.R.A.S.). Av. Quito km 1.5, Vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

[†] Autor para correspondencia: aalvarezs@uteq.edu.ec

³ Colegio de Postgraduados-Campus Veracruz, Posgrado en Agroecosistemas Tropicales. Carretera Xalapa-Veracruz km 88.5. Col. Tepetates. 91690 Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México; (A.S.E.).

RESUMEN

La producción intensiva de tilapia roja y camarón genera residuos orgánicos con alto potencial para su aprovechamiento biotecnológico en la biofertilización y recuperación de suelos agrícolas. El objetivo de esta investigación fue evaluar la aplicación biotecnológica de biosólidos provenientes de camarón blanco (*Penaeus vannamei*) y tilapia roja (*Oreochromis* sp.) como agentes de biofertilización, y su efecto en los parámetros agronómicos y productivos del cultivo de pepino (*Cucumis sativus*). El ensayo se desarrolló en el campus experimental "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (Ecuador), empleando un diseño de bloques completamente al azar con seis tratamientos, incluidos dos controles (positivo y negativo): T1 (control sin fertilización), T2 (6 g de biosólidos de tilapia roja), T3 (6 g de biosólidos de camarón), T4 (8 g de biosólidos de tilapia roja), T5 (8 g de biosólidos de camarón) y T6 (7.5 g de fertilización inorgánica). Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones, evaluándose un total de 600 plantas. Se registraron variables de emergencia, crecimiento agronómico y producción. Los resultados demostraron que el tratamiento T4 (8 g de biosólidos de tilapia roja) presentó los mayores valores en altura de planta (103.77 ± 16.21 cm), número de flores (7.040 ± 2.098), número de hojas (13.00 ± 3.55), peso del fruto (153.71 ± 42.39 g), longitud del fruto (16.11 ± 3.418 cm), diámetro del fruto (4.07 ± 0.6437 cm), biomasa fresca (90.107 ± 1.152 g), biomasa seca (9.893 ± 1.152 g) y rendimiento (192.14 kg·ha⁻¹). Estos resultados evidencian el potencial biotecnológico de los biosólidos acuícolas como biofertilizantes sostenibles y sugieren el uso de biosólidos de tilapia roja en dosis de 8 g como una alternativa eficiente y ecológica frente a la fertilización inorgánica convencional.

Palabras clave: acuicultura, agricultura, fertilización sostenible, hortalizas, residuos orgánicos.

SUMMARY

The intensive production of red tilapia and shrimp generates organic residues with significant potential for biotechnological use in biofertilization and the recovery of agricultural soils. The objective of this study was to evaluate the biotechnological application of biosolids derived from white shrimp (*Penaeus vannamei*) and red tilapia (*Oreochromis* sp.) as biofertilizing agents, and to analyze their effects on



Cita recomendada:

Ortega-Villamar, J. G., Álvarez-Sánchez, A. R., & Soto-Estrada, A. (2026). Aplicación Biotecnológica de Biosólidos de Camarón Blanco (*Penaeus vannamei*) y Tilapia Roja (*Oreochromis* sp.) como Agentes de Biofertilización en la Producción de Pepino (*Cucumis sativus*). *Terra Latinoamericana*, 44, 1-15. e2447. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2447>

Recibido: 6 de noviembre de 2025.
Aceptado: 8 de enero de 2026.
Artículo. Volumen 44.
Abril de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

the agronomic and productive parameters of cucumber (*Cucumis sativus*) cultivation. The experiment was conducted at the "La María" experimental campus of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo (Ecuador), using a randomized complete block design with six treatments, including two controls (positive and negative): T1 (unfertilized control), T2 (6 g of red tilapia biosolids), T3 (6 g of shrimp biosolids), T4 (8 g of red tilapia biosolids), T5 (8 g of shrimp biosolids), and T6 (7.5 g of inorganic fertilization). Each treatment was replicated four times, evaluating a total of 600 plants. Variables related to emergence, agronomic growth, and yield were recorded. The results showed that Treatment 4 (8 g of red tilapia biosolids) obtained the highest values for plant height (103.77 ± 16.21 cm), number of flowers (7.040 ± 2.098), number of leaves (13.00 ± 3.55), fruit weight (153.71 ± 42.39 g), fruit length (16.11 ± 3.418 cm), fruit diameter (4.07 ± 0.6437 cm), fresh biomass (90.107 ± 1.152 g), dry biomass (9.893 ± 1.152 g), and yield (192.14 kg ha⁻¹). These findings demonstrate the biotechnological potential of aquaculture biosolids as sustainable biofertilizers and suggest the use of 8 g of red tilapia biosolids as an efficient and environmentally friendly alternative to conventional inorganic fertilization.

Index words: aquaculture, agriculture, sustainable fertilization, horticultural crops, organic residues.

INTRODUCCIÓN

La acuicultura se ha consolidado como una de las industrias agroalimentarias más dinámicas y sostenibles del siglo XXI, al aportar cerca del 50 % de los productos pesqueros consumidos a nivel mundial (FAO, 2022; Naylor *et al.*, 2021). Esta actividad contribuye significativamente a la seguridad alimentaria, la generación de empleo y el desarrollo rural sostenible, apoyándose en estrategias biotecnológicas que optimizan la producción y reducen el impacto ambiental (Olaganathan y Kar Mun, 2017; Kaminski *et al.*, 2024). Entre las especies de mayor relevancia destacan el camarón blanco (*Penaeus vannamei*) y la tilapia roja (*Oreochromis* sp.), reconocidas por su alta productividad, adaptabilidad y valor comercial, lo que las posiciona como pilares fundamentales de la economía acuícola global (Emerenciano *et al.*, 2022; Sallam, *et al.*, 2025).

En Ecuador, la acuicultura constituye uno de los sectores económicos más importantes, con exportaciones superiores a los 5 mil millones de dólares anuales, principalmente gracias al cultivo de camarón blanco, que representa más del 50 % de la producción nacional (Sonnenholzner, 2021). La tilapia roja, por su parte, se ha consolidado como una fuente estratégica de proteína animal para los mercados interno y externo, generando empleo y fortaleciendo la seguridad alimentaria local (Jácome, Quezada, Sánchez, Pérez y Nirchio, 2019; Arumugam *et al.*, 2023). No obstante, la intensificación de estos sistemas productivos genera grandes volúmenes de biosólidos cuya disposición inadecuada puede ocasionar contaminación del agua, eutrofización y degradación del suelo.

Uno de los principales desafíos asociados a la expansión acuícola es la acumulación de biosólidos en los estanques de cultivo. Estos residuos, ricos en materia orgánica, nitrógeno, fósforo y microorganismos activos, pueden convertirse en una fuente relevante de contaminación ambiental si no son tratados o reutilizados adecuadamente (Liu *et al.*, 2024). En este contexto, la adopción de estrategias de economía circular orientadas a la valorización de estos subproductos se ha convertido en una prioridad tanto ecológica como económica.

Una alternativa biotecnológica prometedora es el uso de biosólidos acuícolas como biofertilizantes. Estos materiales orgánicos, al estar enriquecidos con nutrientes esenciales y compuestos bioactivos, pueden mejorar la estructura del suelo, incrementar la disponibilidad de nutrientes y estimular la actividad microbiana edáfica (Van Tung *et al.*, 2021). Su incorporación en procesos agrícolas representa una estrategia de biorremediación que no solo reduce la contaminación ambiental, sino que transforma un residuo en un insumo de alto valor agronómico, disminuyendo la dependencia de fertilizantes químicos convencionales.

El cultivo de pepino (*Cucumis sativus*) fue elegido para este estudio debido a su importancia económica y nutricional, así como a su sensibilidad a la calidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes. A nivel global, el pepino es una de las hortalizas más consumidas por su alto contenido de agua, fibra dietética, vitaminas y compuestos antioxidantes, además de su bajo aporte calórico (Alkharpotly, Shehata y Abd El Rasheed, 2019). En sistemas intensivos de producción, la búsqueda de alternativas sostenibles de fertilización es un reto relevante. Diversos estudios señalan que la aplicación de biosólidos provenientes de estanques de *P. vannamei* y *Oreochromis* sp. puede mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, incrementando el crecimiento y el rendimiento del cultivo en comparación con la fertilización inorgánica tradicional.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación biotecnológica de biosólidos de camarón blanco y tilapia roja como agentes de biofertilización en los parámetros agronómicos y productivos del pepino, determinando su potencial como alternativa sostenible para el manejo de residuos acuícolas. La relevancia de este estudio radica en promover el uso responsable de los subproductos generados por la acuicultura en el marco de una economía circular, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental y fortaleciendo sistemas agrícolas más sostenibles. Asimismo, aporta conocimiento científico aplicable a la integración entre los sectores acuícola y agrícola, impulsando la innovación biotecnológica en la gestión de suelos y la producción de alimentos inocuos y de alto valor nutricional.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la Finca Experimental "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), durante el período comprendido entre el 27 de mayo y el 18 de julio de 2024. El sitio experimental se encuentra ubicado en el km 7 de la vía Quevedo-El Empalme, recinto San Felipe, cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador, en las coordenadas geográficas 1° 04' 48." S y 79° 30' 03.7" O, a una altitud promedio de 120 m de altitud. La zona presenta un clima tropical húmedo, con una temperatura media anual de 25.8 °C, humedad relativa del 80% y precipitación promedio de 2200 mm anuales, condiciones favorables para el desarrollo del cultivo de pepino (*Cucumis sativus*).

El experimento se estableció bajo un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA), con seis tratamientos incluyendo dos grupos control (negativo y positivo), utilizando un total de 600 plantas distribuidas homogéneamente. Los tratamientos fueron: T1 (control sin fertilización), T2 (6 g de biosólidos de tilapia roja), T3 (6 g de biosólidos de camarón blanco), T4 (8 g de biosólidos de tilapia roja), T5 (8 g de biosólidos de camarón blanco) y T6 (7.5 g de fertilizante inorgánico formulado como Abono Completo 8-20-20, con 8% N, 20% P₂O₅, 20% K₂O y 24.68% de cloruros). Este último se consideró la referencia convencional para contrastar el desempeño de los biosólidos.

La aplicación del fertilizante inorgánico se realizó manualmente siguiendo las recomendaciones agronómicas del cultivo. Las dosis de biosólidos (6 g y 8 g) se aplicaron de manera localizada en la base de cada planta, considerando cada una como unidad experimental independiente. La distribución aleatoria y la aplicación uniforme permitieron reducir la variabilidad ambiental y garantizar la validez estadística del ensayo.

Los biosólidos fueron recolectados de los sedimentos acumulados al final del ciclo productivo en estanques de cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) y camarón blanco (*Penaeus vannamei*). La tilapia roja utilizada en este sistema era de origen comercial (no silvestre) y fue cultivada bajo un sistema biofloc, cuyos elevados niveles de sólidos suspendidos y actividad microbiana modifican la composición físico-química del sedimento, como lo han documentado estudios recientes (Raza, Zheng y Yang, 2024; Jerônimo, da Cruz, Bertaglia, Furtado y Martins, 2022). Los biosólidos de camarón procedieron de estanques con salinidad moderada (8-12 PSU), valores típicos de sistemas semi-intensivos de la región costera latinoamericana (Cao, Le y Eppe, 2025; Rebolledo y Verduga, 2023). La salinidad es un parámetro relevante por su influencia en la disponibilidad de macro y micronutrientes del sedimento (Berger, Frör y Schäfer, 2019; Al-Wabel *et al.*, 2024).

El material recolectado se transportó en tanques plásticos de 60 L y se dispuso en lechos de secado expuestos a radiación solar. La estabilización se realizó mediante la adición de cal (CaO o Ca(OH)₂) al 10% (p/p), logrando un pH final de 12.1 ± 0.2 mantenido por más de 2 h. Estudios recientes confirman que este tratamiento es eficaz en la reducción de coliformes fecales, *Salmonella spp.* y otros microorganismos patógenos entéricos (Ferdous, Khan, Rahman, Kamal y Reza, 2023; Wang *et al.*, 2022). Posteriormente, los biosólidos se sometieron a secado solar durante 7 días, alcanzando temperaturas superficiales de 38 - 42 °C, con picos de 48 °C. La combinación de alcalinización y secado térmico es considerada un método eficiente para la sanitización y estabilización de biosólidos destinados al uso agrícola (Chen, Yi, Li, Guo, y Xiao, 2020; Bhattacharyya *et al.*, 2021), como se muestra en la Figura 1.

Todos los parámetros del proceso (pH, tiempo de retención, temperatura y duración del secado) fueron monitoreados con instrumentos calibrados para asegurar la reproducibilidad del procedimiento. El protocolo seguido es consistente con las recomendaciones internacionales actuales para la obtención de biosólidos seguros y aptos para su aplicación agrícola (Elgarahy *et al.*, 2024; Miguel *et al.*, 2020; Pérez, Tortosa, González, Cayunao y Curaqueo, 2024).

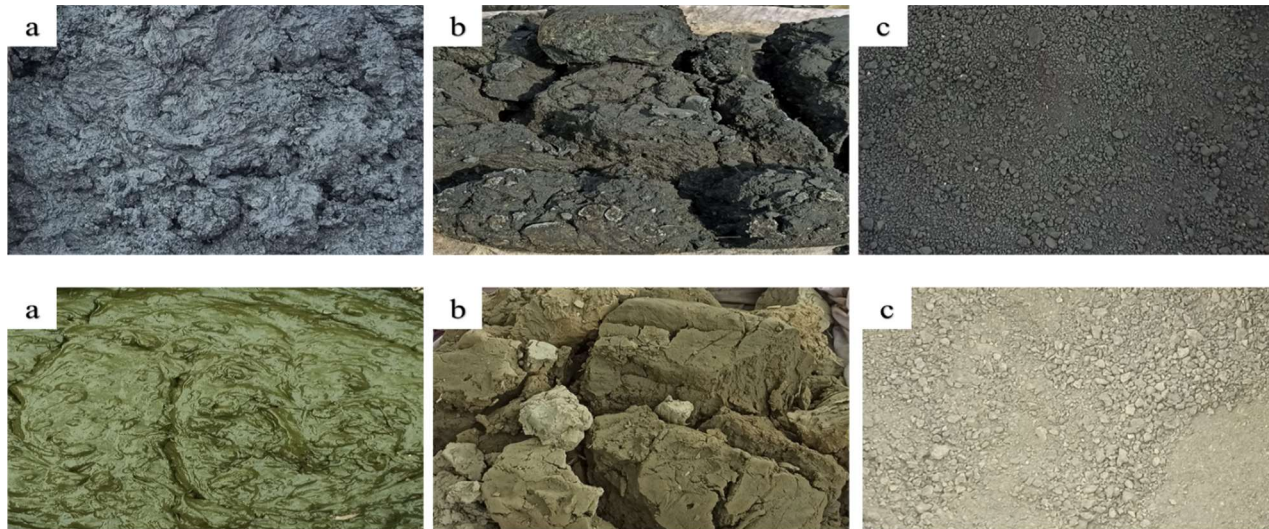


Figura 1. Caracterización visual de los biosólidos de camarón (*Penaeus vannamei*) y tilapia roja (*Oreochromis sp.*) en diferentes etapas de procesamiento: (a) biosólido fresco, (b) biosólido seco y (c) biosólido transformado en humus.

Figure 1. Visual characterization of shrimp (*Penaeus vannamei*) and red tilapia (*Oreochromis sp.*) biosolids at different processing stages: (a) fresh biosolid, (b) dried biosolid, and (c) biosolid converted into humus.

Análisis Físicoquímicos y Microbiológicos de Biosólidos

Las muestras de biosólidos recolectadas fueron analizadas en el Laboratorio de Servicios Ambientales LABCESTTA S.A., donde se realizaron los análisis físicoquímicos y microbiológicos correspondientes para los biosólidos provenientes de camarón blanco y tilapia roja. Los parámetros físicoquímicos evaluados incluyeron conductividad eléctrica, pH, contenido de humedad y materia orgánica, siguiendo la metodología descrita por (Pis *et al*, 2015).

Para la cuantificación de metales pesados totales se determinaron sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), cobre (Cu), plomo (Pb), manganeso (Mn), hierro (Fe) y cadmio (Cd), utilizando el método de digestión ácida propuesto por Sáez-Plaza, Asuero y Martín (2019), adaptado como procedimiento interno del laboratorio para muestras con elevado contenido de materia orgánica. Posteriormente, la cuantificación se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica, siguiendo como referencia el método APHA 3111B, utilizando un espectrofotómetro PerkinElmer (modelo PinAAcle 900T), junto con el instrumental complementario requerido para el análisis (Cobos, Chávez y Moreno, 2019).

El análisis microbiológico se efectuó mediante la técnica de tubos de fermentación múltiple para la determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales y coliformes fecales, conforme a los procedimientos descritos por Hammad *et al.* (2022). Esta metodología, basada en la fermentación de lactosa a 35 ± 2 °C, permite estimar la carga bacteriana presente en los biosólidos después del proceso de estabilización (Tambi, Brighu y Gupta, 2023).

Análisis Físicos Químicos de Suelo

El experimento se llevó a cabo en la estación experimental La María, que sirvió exclusivamente como sitio de prueba. Antes de aplicar los tratamientos con lodos de depuradora pesquera, se tomaron muestras de suelo para la caracterización físicoquímica inicial del área experimental. Las muestras se tomaron a una profundidad de 0 a 20 cm mediante muestreo compuesto, donde se combinaron submuestras distribuidas aleatoriamente dentro de la parcela según métodos estandarizados de análisis de suelos. (Franco, Catucuago, Alvarez y Bazantes, 2021). Las muestras de suelo recolectadas se secaron al aire, se homogeneizaron y se tamizaron a 2 mm. Posteriormente, se analizaron en el laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), estación experimental de Pichilingue. Se determinaron el pH en una suspensión suelo-agua (1:2,5), el contenido de materia orgánica, la conductividad eléctrica, el nitrógeno total, el fósforo disponible y el potasio intercambiable, utilizando métodos estándar para evaluar el impacto agronómico de los lodos de depuradora de residuos pesqueros y acuícolas en suelos agrícolas. (Montoya, Mora y Vásquez, 2020; Lugo-Avilés, López, Roman y Lugo, 2024; Fruscella, Kotzen, Paradelo y Milliken, 2025). Estos análisis permitieron establecer la condición inicial del suelo y servir como referencia para evaluar los cambios edáficos asociados a la aplicación de biosólidos de peces.

Material Vegetal

Se emplearon semillas híbridas de pepino (*Cucumis sativus*) variedad Darlington, seleccionadas por su alta productividad y adaptación a condiciones tropicales. El experimento se desarrolló bajo condiciones de campo abierto en un área total de 375 m² (30 m de largo × 12.5 m de ancho), la cual fue distribuida en parcelas experimentales de 4 × 2 m (8 m²). En cada tratamiento se evaluaron 25 plantas, establecidas mediante un sistema de siembra indirecta, previo a la germinación en vasos de 50 oz con sustrato orgánico esterilizado.

Cuando las plántulas desarrollaron dos hojas verdaderas, fueron trasplantadas al área experimental bajo condiciones de campo abierto. La densidad de población utilizada fue de 25 plantas·m⁻², con un espaciamiento de 50 cm entre plantas y 1 m entre hileras, garantizando una distribución homogénea y adecuada ventilación.

Los biosólidos de tilapia roja y camarón blanco se aplicaron como biofertilizantes a 30 cm del tallo principal, distribuidos sobre la superficie del suelo. La frecuencia de aplicación fue cada 10 días durante todo el ciclo del cultivo, siguiendo las recomendaciones metodológicas de Soto, Rivera, Gonzalez y Ayala (2019) y (Niswati *et al.*, 2018).

Estas aplicaciones permitieron evaluar el efecto de diferentes dosis de biosólidos en variables agronómicas clave del cultivo, tales como crecimiento vegetativo, floración y rendimiento, bajo un enfoque de sostenibilidad y aprovechamiento biotecnológico de residuos acuícolas.

Variables Morfométricas

La evaluación de las variables morfométricas se inició 10 días después del trasplante (DDT) y se mantuvo durante todo el ciclo del cultivo. Las mediciones incluyeron altura de planta (cm), número de hojas por planta, número de flores por planta, número de frutos por planta, longitud del fruto (cm), diámetro del fruto (mm) y peso promedio del fruto (g). Asimismo, se determinó el rendimiento total (kg·ha⁻¹) mediante la extrapolación de la producción obtenida en cada unidad experimental.

Para la estimación de la biomasa fresca y seca, se seleccionaron aleatoriamente 10 plantas por parcela. Las hojas y los tallos fueron separados y pesados inmediatamente después de la cosecha; posteriormente, se secaron en estufa a 70 °C hasta alcanzar un peso constante, siguiendo la metodología descrita por Reyes-Pérez *et al.* (2021).

Análisis Estadísticos

Los datos correspondientes a las variables morfométricas y productivas del cultivo de pepino se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA), con el fin de evaluar el efecto de los tratamientos con biosólidos sobre las características agronómicas del cultivo.

Previamente al análisis, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Cuando se identificaron diferencias significativas entre tratamientos, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Minitab® versión 19 (Minitab LLC, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Físicoquímicos

En los biosólidos de tilapia roja, el análisis físicoquímico mostró valores de pH de 7.3, conductividad eléctrica de 1185 $\mu\text{S cm}^{-1}$, humedad del 7.7%, materia orgánica del 12.05%, y concentraciones de metales pesados y macronutrientes dentro de los rangos permitidos: cadmio (Cd) < 0.25 mg kg⁻¹, cobre (Cu) < 50 mg kg⁻¹, manganeso (Mn) 342.97 mg kg⁻¹, hierro (Fe) 2637.69 mg kg⁻¹, sodio (Na) 766.50 mg kg⁻¹, potasio (K) 29889.39 mg kg⁻¹, plomo (Pb) < 10 mg kg⁻¹ y calcio (Ca) > 30000 mg kg⁻¹.

En los biosólidos de camarón, los valores obtenidos fueron: pH 8.65, conductividad eléctrica 1198 $\mu\text{S cm}^{-1}$, humedad 10.29%, materia orgánica 1.89%, cadmio (Cd) < 0.25 mg kg⁻¹, cobre (Cu) < 50 mg kg⁻¹, manganeso (Mn) 212.64 mg kg⁻¹, hierro (Fe) 22506.78 mg kg⁻¹, sodio (Na) 3176.73 mg kg⁻¹, potasio (K) 1887.71 mg kg⁻¹, plomo (Pb) < 10 mg kg⁻¹ y calcio (Ca) > 8615.67 mg kg⁻¹.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Radziemska, Vaverková, Adamcová, Brtnický y Mazur (2019), quienes señalan que los biosólidos estabilizados pueden presentar niveles bajos de metales pesados, aptos para su uso agrícola. Sin embargo, es indispensable mantener un monitoreo periódico a fin de prevenir acumulaciones potenciales de elementos como Cd, Pb o Cu, tal como recomiendan Florez, Roldán, Omote y Molleda (2021).

El aporte nutricional encontrado, especialmente en potasio (K), es relevante debido a su función en la resistencia a plagas y enfermedades, así como en la formación de frutos y hojas (Terraza, Terán, Carrasco y Verdugo, 2017). Asimismo, el contenido de materia orgánica contribuye a mejorar la estructura del suelo, retención de humedad y disponibilidad de nutrientes, corroborando lo señalado por Fernández y Quesada (2018) y por Martínez-Rodríguez *et al.* (2021).

Análisis Microbiológico

Los análisis microbiológicos mostraron valores de coliformes totales $< 1.8 \text{ NMP g}^{-1}$ y coliformes fecales $< 1.8 \text{ NMP g}^{-1}$ tanto en los biosólidos de tilapia roja como en los de camarón. Estos valores se encuentran por debajo de los límites permitidos para materiales de uso agrícola, lo cual indica condiciones sanitariamente seguras, de acuerdo con lo propuesto por Flores-Ramírez, Ortega, Cuetero, de Los Cobos y Noyola (2023).

La baja carga microbiana patógena respalda la viabilidad del uso de biosólidos estabilizados como insumo agrícola, ya que además favorecen la actividad microbiana benéfica del suelo. La materia orgánica disponible sirve como fuente energética para los microorganismos descomponedores, que liberan nutrientes esenciales y aumentan la capacidad de intercambio catiónico, tal como describen Krishnan, Chandrakant, Susitharan y AM (2023), Schembri, Kaczmar, Osborn, Timmons y Mattson (2025) y Hai, Kien y Hung, (2024).

Sun *et al.* (2021) destacan que, en sistemas de hortalizas como el pepino, los hongos y microorganismos del suelo desempeñan un papel decisivo en la salud y productividad del cultivo. De igual manera, Guzmán y Montero (2021) enfatizan que las interacciones planta-microorganismo, en especial la fijación biológica de nitrógeno (FBN), contribuyen a la sostenibilidad agrícola.

Finalmente, la incorporación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, presentes de forma natural en materiales orgánicos como los biosólidos, puede reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mejorar la sanidad del cultivo, apoyando lo señalado por Li *et al.* (2020).

Análisis Fisicoquímico del Suelo

El análisis químico del suelo de la Finca Experimental La María mostró un pH de 5.5, clasificado como ácido, condición habitual en los suelos del litoral ecuatoriano sometidos a alta precipitación, donde la lixiviación de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} es intensa (Sori, Iticha y Takele, 2021). Esta acidez limita la disponibilidad de macronutrientes, especialmente Ca, Mg y P, debido a la mayor saturación del complejo de intercambio por Al y Fe, fenómeno ampliamente reportado en suelos ácidos del trópico húmedo (Maru *et al.*, 2020).

El fósforo disponible fue de 10 mg kg^{-1} , valor catalogado como bajo a medio, cuya disponibilidad se ve restringida en pH menores de 5.5 debido a su fijación con hidróxidos de Fe y Al (Ch'ng, Haruna, Majid y Jalloh, 2019). El potasio intercambiable alcanzó $1.47 \text{ meq } 100 \text{ mL}^{-1}$, un nivel alto, lo que indica baja movilidad relativa de este elemento en comparación con Ca y Mg. El calcio ($1.1 \text{ meq } 100 \text{ mL}^{-1}$) se encontró en nivel medio, mientras que el magnesio ($3.6 \text{ meq } 100 \text{ mL}^{-1}$) fue alto, lo cual es consistente con suelos que, aunque lixiviados, aún conservan parte de su reserva de bases intercambiables (Sori *et al.*, 2021). El contenido de azufre (2.3 mg kg^{-1}) fue bajo, en concordancia con la alta movilidad del sulfato en ambientes húmedos, donde fácilmente migra a horizontes más profundos (Maru *et al.*, 2020).

Respecto a micronutrientes, el zinc se clasificó como alto (categoría A), mientras que el hierro y manganeso también se ubicaron en rangos altos, condición esperable en suelos ácidos donde estos elementos aumentan su solubilidad (Xia *et al.*, 2024). El boro, con 0.18 mg kg^{-1} , se catalogó como bajo, un patrón típico de suelos con alta precipitación y acidez elevada, dada su fuerte susceptibilidad a la lixiviación (Ch'ng *et al.*, 2019).

En conjunto, estos resultados reflejan la condición típica de los suelos ácidos de textura media del litoral ecuatoriano. Las limitaciones principales derivan de la acidez y de la baja disponibilidad de P, S y B, mientras que la disponibilidad de Ca y Mg se mantiene en rangos aceptables. En este contexto, prácticas de manejo como el encalado, la incorporación de materia orgánica y el uso de fuentes suplementarias de S y B se presentan como estrategias viables para mejorar la disponibilidad nutrimental y la productividad del sistema, como lo han demostrado Maru *et al.* (2020) y Ch'ng *et al.* (2019) en suelos tropicales comparables.

Parámetros Agronómicos

Altura de Planta del Cultivo de Pepino

La evaluación de los tratamientos a lo largo del ciclo de cultivo evidenció diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) en la altura de las plantas de pepino durante los 40 días de observación. En general, los tratamientos con biosólidos mostraron una influencia positiva en el crecimiento del cultivo en comparación con el control negativo, especialmente en las etapas de desarrollo más avanzadas.

El tratamiento con biosólidos de tilapia roja (BT) a una dosis de 6 g registró incrementos notables en la altura de las plantas, alcanzando 18.446 ± 0.6316 cm a los 10 días y 47.697 ± 5.813 cm a los 20 días, superando al control en 2.035 cm y 7.304 cm, respectivamente. A los 30 y 40 días, las plantas tratadas con BT 6 g mantuvieron esta tendencia, alcanzando 69.70 ± 10.77 cm y 99.17 ± 16.30 cm, lo que representó incrementos de 3.628 cm y 16.747 cm respecto al control. El biosólido de camarón (BC) en la misma dosis presentó un comportamiento similar, aunque con valores ligeramente inferiores a los observados con biosólidos de tilapia roja.

Al incrementar la dosis a 8 g, el biosólido de tilapia roja (BT 8 g) obtuvo las mayores alturas registradas entre los tratamientos. Las plantas alcanzaron 18.816 ± 0.9065 cm a los 10 días y 55.781 ± 4.763 cm a los 20 días, superando al control en 2.405 cm y 15.388 cm, respectivamente. En las mediciones de los 30 y 40 días, el crecimiento aumentó a 73.715 ± 6.306 cm y 103.77 ± 16.21 cm, correspondientes a diferencias significativas ($p \leq 0.05$) de 7.643 cm y 21.347 cm respecto al control. La aplicación de 8 g de biosólidos de camarón (BC 8 g) también promovió un crecimiento considerable; sin embargo, los valores fueron levemente inferiores a los reportados para el biosólido de tilapia roja a la misma dosis, lo que sugiere que la composición nutricional del biosólido influye directamente en la tasa de elongación del cultivo de pepino (Cuadro 1).

La composición de los biosólidos provenientes de estanques piscícolas constituye un recurso valioso debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes. Drózdź *et al.* (2020) señalan que este tipo de materiales posee un notable potencial como biofertilizante para su uso en agricultura, horticultura y como mejorador de suelos. En este sentido, los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con estudios donde diversas fuentes de abonos orgánicos favorecen el crecimiento y desarrollo de plantas hortícolas. Por ejemplo, Pérez *et al.* (2017) reportaron longitudes de 69.27, 129.73 y 164.68 cm en plantas de pepino a los 30, 45 y 60 días tras la aplicación de humus de lombriz y biomasa de jacinto de agua, evidenciando un claro efecto estimulante en la elongación y vigor de la planta.

La producción hortícola bajo sistemas controlados y el uso de estrategias de manejo orgánico se ha extendido exitosamente en diversas regiones del mundo, debido a su capacidad para mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad del cultivo (Gamage *et al.*, 2023). En particular, los abonos derivados de residuos animales contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo desde los puntos de vista físico, químico y biológico, promoviendo la actividad microbiana y garantizando el suministro de nutrientes esenciales. Este enfoque permite fortalecer la productividad agrícola y, simultáneamente, favorecer la salud humana y ambiental desde una perspectiva territorial y comunitaria (Huerta, Cruz y Aguirre, 2019).

Cuadro 1. Altura de plantas de pepino (*Cucumis sativus*) fertilizadas con biosólidos de camarón blanco (*Penaeus vannamei*) y tilapia roja (*Oreochromis* sp.) en diferentes dosis.

Table 1. Plant height of cucumber (*Cucumis sativus*) fertilized with biosolids from white shrimp (*Penaeus vannamei*) and red tilapia (*Oreochromis* sp.) at different doses.

Tratamientos	Plantas (n)	Altura de planta (cm)			
		10 DDT	20 DDT	30 DDT	40 DDT
T1: Control experimental	100	16.411 ± 0.261 c	40.393 ± 1.640 c	66.072 ± 2.40 b	82.423 ± 2.24 c
T2: BT 6 g	100	18.446 ± 0.1598 b	47.70 ± 3.18 b	69.70 ± 3.67 ab	95.90 ± 2.64 abc
T3: BC 6 g	100	18.2280 ± 0.1789 b	46.836 ± 1.396 b	68.92 ± 4.56 ab	89.26 ± 12.67 bc
T4: BT 8 g	100	18.816 ± 0.320 b	55.781 ± 1.568 a	73.715 ± 1.665 a	103.77 ± 6.88 ab
T5: BC 8 g	100	18.761 ± 0.462 b	49.37 ± 2.34 b	69.550 ± 1.892 ab	99.65 ± 7.22 ab
T6: NPK 7.5 g	100	19.5710 ± 0.0835 a	58.38 ± 2.35 a	75.234 ± 2.94 a	106.05 ± 6.51 a
Valor p		0.000	0.000	0.005	0.001
CV		1.49	4.36	4.29	7.53

Letras iguales en una misma columna indican que no existe diferencia estadística significativa según la prueba de Tukey ($p \geq 0.05$); BT = biosólido de tilapia roja; BC = biosólido de camarón; NPK = fertilizante mineral compuesto por nitrógeno, fósforo y potasio. Identical letters within the same column indicate no statistically significant differences according to Tukey's test ($p \geq 0.05$); BT = red tilapia biosolid; BC = shrimp biosolid; NPK = mineral fertilizer composed of nitrogen, phosphorus, and potassium.

Los resultados obtenidos en este estudio también son congruentes con investigaciones desarrolladas en sistemas acuícolas, donde los biosólidos provenientes de estanques han demostrado mejorar las propiedades físicas y químicas del sustrato cuando se emplean como enmiendas orgánicas.

(Mehmood *et al.*, 2023) reportaron que los lodos de estanques de tilapia roja, una vez estabilizados o compzostados, incrementan la retención de humedad y la disponibilidad de nitrógeno y fósforo, lo que se traduce en un crecimiento vegetal superior al observado en sustratos sin enmiendas.

De manera similar, Thanh *et al.*, (2023), Wankanapol, Chaibu y Soonthornvipat (2017) y Luo *et al.*, (2025) evidenciaron que los sedimentos y biosólidos provenientes de sistemas camaroneros y biofloc contienen concentraciones elevadas de materia orgánica y micronutrientes, favoreciendo el desarrollo vegetativo cuando se aplican en dosis adecuadas. Estos antecedentes respaldan el potencial de los biosólidos acuícolas, tanto de tilapia roja como de camarón, como fuentes orgánicas eficientes para mejorar el crecimiento inicial y el rendimiento de cultivos hortícolas, siempre que su estabilización y manejo sean apropiados.

Número de Hojas

La evaluación del número de hojas en las plantas de pepino bajo los seis tratamientos evidenció diferencias claras a lo largo del ciclo de cultivo. En el Cuadro 2 se presentan los valores promedio del número de hojas por planta en los diferentes tiempos de evaluación. El Tratamiento 6 presentó el mayor desarrollo foliar, iniciando con 4.81 ± 0.77 hojas a los 10 días después del trasplante (DDT) y aumentando progresivamente a 7.69 ± 1.50 hojas a los 20 días, 13.04 ± 1.41 hojas a los 30 días y 16.65 ± 3.43 hojas a los 40 días. Esta tendencia creciente confirma la eficacia de este tratamiento para estimular el crecimiento vegetativo del cultivo.

En contraste, el Tratamiento 1 mostró el menor rendimiento foliar en todos los intervalos evaluados, comenzando con 3.77 ± 0.66 hojas a los 10 días y alcanzando únicamente 13.63 ± 3.08 hojas al día 40. Los Tratamientos 2, 3 y 5 registraron valores intermedios, mientras que el Tratamiento 4 mostró un desempeño superior dentro de este grupo, destacándose especialmente al final del ciclo con 15.89 ± 3.75 hojas.

Cuadro 2. Análisis morfométrico del número de hojas en plantas de pepino (*Cucumis sativus*) fertilizadas con biosólidos de camarón (*Penaeus vannamei*) y tilapia roja (*Oreochromis sp.*), y tratamientos de control.

Table 2. Morphometric analysis of leaf number in cucumber (*Cucumis sativus*) plants fertilized with biosolids from shrimp (*Penaeus vannamei*) and red tilapia (*Oreochromis sp.*), including control treatments.

Tratamientos	Plantas (n)	Número de hojas			
		10 DDT	20 DDT	30 DDT	40 DDT
T1: Control	100	3.7700 ± 0.6645 e	6.750 ± 1.132 b	9.560 ± 2.124 d	13.630 ± 3.077 d
T2: BT 6 g	100	4.2400 ± 0.7264 cd	7.490 ± 1.210 a	10.910 ± 2.011 c	15.130 ± 3.164 bc
T3: BC 6 g	100	4.0100 ± 0.6435 de	6.890 ± 1.601 b	9.820 ± 1.559 ab	14.560 ± 2.451 cd
T4: BT 8 g	100	4.5500 ± 0.8087 ab	7.740 ± 1.011 a	12.750 ± 1.507 a	15.890 ± 3.747 ab
T5: BC 8 g	100	4.3500 ± 0.6093 bc	6.610 ± 1.556 b	11.860 ± 1.980 b	14.900 ± 2.699 bc
T6: NPK 7.5 g	100	4.8100 ± 0.7745 a	7.690 ± 1.502 a	13.040 ± 1.406 a	16.650 ± 3.427 a
Valor p		0.008	0.006	0.001	0.006
CV		3.29	5.22	7.16	12.83

Letras iguales en una misma columna indican que no existe diferencia estadística significativa según la prueba de Tukey ($p \geq 0.05$); BT = biosólido de tilapia roja; BC = biosólido de camarón; NPK = fertilizante mineral compuesto por nitrógeno, fósforo y potasio.

Identical letters within the same column indicate no statistically significant differences according to Tukey's test ($p \geq 0.05$); BT = red tilapia biosolid; BC = shrimp biosolid; NPK = mineral fertilizer composed of nitrogen, phosphorus, and potassium.

Número de Flores

El tratamiento con biosólido de tilapia roja a 8 g registró el mayor número de flores por planta, lo que sugiere que su composición favorece la diferenciación floral y el desarrollo reproductivo. Este efecto podría estar asociado al aporte de macro y micronutrientes presentes en los biosólidos acuícolas, los cuales contienen altas concentraciones de proteínas que, tras su degradación, incrementan el nitrógeno amoniacal total (NAT), nutriente clave para procesos fisiológicos relacionados con la floración (Hepsibha y Geetha, 2019).

De acuerdo con Zhou (2024), los biofertilizantes derivados de residuos animales estimulan la germinación, floración, formación de frutos y la reproducción vegetal, debido a la acción de microorganismos eficientes que mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, además de contribuir a la supresión de patógenos. De manera complementaria, Rana, Sharma y Negi (2020), señalan que el número de flores por planta y el cuajado de frutos tienden a incrementarse cuando los abonos orgánicos se combinan con biofertilizantes, debido a la mejora en la disponibilidad de nutrientes y en la actividad microbiana.

No obstante, la respuesta a los abonos orgánicos puede variar según el tipo de material, la dosis aplicada y la especie vegetal. En cultivos ornamentales como geranio y belén, Muñoz y Hernández (2018) encontraron que la lombricomposta mezclada con estiércol vacuno al 25% genera resultados similares a la tierra de hoja, promoviendo una adecuada floración. Sin embargo, proporciones superiores al 50% de estiércol en el sustrato pueden provocar efectos negativos en el crecimiento y floración, evidenciando que la dosis óptima depende de las características químicas del abono y del cultivo evaluado.

Parámetros Productivos del Cultivo de Pepino

La evaluación de los parámetros productivos del cultivo de pepino fertilizado con biosólidos de tilapia roja y camarón blanco mostró que el tratamiento con fertilizante químico NPK (control positivo) presentó los valores más altos, con diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en variables como peso y longitud del fruto.

En comparación con el control experimental (sin fertilización), los tratamientos con biosólidos evidenciaron incrementos consistentes. En el tratamiento con 6 g de biosólido de tilapia roja (BT 6 g), el peso promedio del fruto alcanzó 145.49 ± 55.08 g, la longitud 14.113 ± 3.862 cm, y el diámetro 3.9907 ± 0.6605 mm. El número de frutos por planta aumentó a 1.5700 ± 0.6073 , mientras que la biomasa fresca (90.023 ± 1.113 g) y la biomasa seca (9.977 ± 1.113 g) permanecieron estadísticamente similares al control.

La aplicación de 6 g de biosólido de camarón (BC 6 g) también generó incrementos respecto al control, con un peso promedio del fruto de 136.88 ± 47.12 g, longitud 13.049 ± 3.279 cm, diámetro 3.8911 ± 0.4702 mm, y un número de frutos de 1.4300 ± 0.6237 , manteniendo valores de biomasa comparables al control.

Al incrementar la dosis a 8 g, se observaron mejoras más marcadas. El tratamiento con biosólido de tilapia roja (BT 8 g) registró los valores más altos entre los tratamientos orgánicos: peso promedio del fruto de 153.71 ± 42.39 g, longitud 16.113 ± 3.418 cm, diámetro 4.0717 ± 0.6437 mm, y número de frutos de 1.8000 ± 0.8165 .

De forma similar, el tratamiento con 8 g de biosólido de camarón (BC 8 g) mostró incrementos respecto al control experimental, con un peso promedio del fruto de 148.16 ± 54.94 g y una longitud de 15.388 ± 3.371 cm, aunque con valores ligeramente inferiores a los observados en BT 8 g. En ambos tratamientos con 8 g, la biomasa fresca y seca permaneció estadísticamente similar al control, lo que indica que el efecto principal de los biosólidos se reflejó en la productividad del fruto más que en la acumulación de biomasa vegetal.

Padilla y Pérez (2017), describieron la calidad de cinco genotipos de pepino cultivados bajo condiciones de invernadero durante la época seca, obteniendo promedios de longitud de fruto entre 21.63 y 23.85 cm, diámetros entre 48.57 y 49.97 mm, número de frutos entre 21.63 y 24.31, y pesos promedio por fruto de 304.51 a 378.51 g. Estos valores difieren de los obtenidos en el presente estudio, lo que puede atribuirse a las condiciones de cultivo, genotipos evaluados y tipo de fertilización aplicada. Por otra parte, An, Cho, Gu, Kim y Han (2017) determinaron diferencias significativas entre el uso de 100 mg L^{-1} de fertilizante orgánico líquido y un fertilizante comercial en el cultivo de pepino orgánico; sin embargo, el peso fresco y seco de hojas, tallos y frutos fue mayor cuando se aplicó fertilizante orgánico elaborado a partir de harina de pescado. De manera similar, la irrigación por inmersión con hidrolizados de pescado en tomate uva generó aumentos respecto al manejo convencional, registrando incrementos de 35% en peso seco de hojas, 9% en biomasa total, 21% en número de frutos y 4% en rendimiento total (García-Santiago *et al.*, 2021). Estos resultados coinciden con estudios previos que han demostrado que la aplicación de biosólidos puede mejorar la calidad y productividad de los frutos en diversos cultivos, incluido el pepino (Ezziddine, Liltved y Homme, 2020).

Rendimientos del Cultivo de Pepino

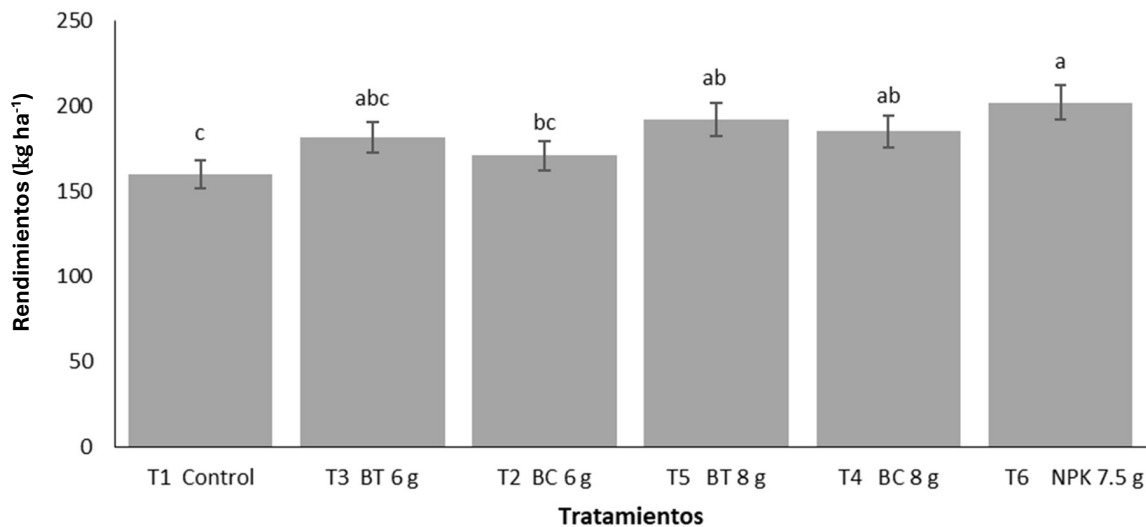
La evaluación del rendimiento por hectárea evidenció que los biosólidos de la tilapia presentaron el mejor desempeño entre los tratamientos orgánicos, como se muestra en la Figura 2. La aplicación de 6 g m⁻² de biosólido de tilapia roja alcanzó un rendimiento de 181.86 kg ha⁻¹, superando al biosólido de camarón en la misma dosis (171.10 kg ha⁻¹). Al incrementar la dosis a 8 g m⁻², se observó un aumento notable en ambos materiales; sin embargo, nuevamente el biosólido de tilapia roja mostró el mayor rendimiento con 192.14 kg ha⁻¹, mientras que el biosólido de camarón registró 185.21 kg ha⁻¹.

Cuando se compararon estos resultados con los tratamientos de control, el fertilizante químico (NPK) presentó el rendimiento más alto del estudio con 202.15 kg ha⁻¹, evidenciando su eficacia bajo las condiciones experimentales. En contraste, el tratamiento sin aplicación de fertilizante mostró el rendimiento más bajo, con 159.88 kg ha⁻¹.

En términos generales, el tratamiento T4 (biosólido de tilapia roja, 8 g) fue el más productivo entre los biosólidos evaluados, mientras que el tratamiento T5 (biosólido de camarón, 8 g) presentó un rendimiento ligeramente inferior, aunque superior al control sin fertilización.

La literatura sugiere que la aplicación de biosólidos en cultivos como el pepino puede mejorar el rendimiento al aportar nutrientes esenciales y mejorar la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y micronutrientes (Ramesh, Amuthavalli y Boopathy, 2020). Padilla y Pérez (2017) reportando producciones por planta entre 6.75 y 8.54 kg, así como rendimientos comerciales de 15.12 a 19.04 kg m⁻² y rendimientos totales de 17.53 a 22.18 kg m⁻², valores superiores a los obtenidos en el presente estudio. Esta diferencia puede atribuirse a que su investigación se realizó en condiciones de invernadero, donde la temperatura, la humedad, la radiación y el suministro hídrico son controlados rigurosamente. La evidencia científica confirma que los sistemas protegidos reducen el estrés abiótico y mejoran la eficiencia fisiológica del pepino, resultando en rendimientos significativamente mayores en comparación con cultivos establecidos a cielo abierto (Yusuf, Al-Yahya, Saleh y Abdel-Ghany, 2025; Fernández y Quesada, 2018).

A diferencia de ello, el presente ensayo se desarrolló bajo condiciones de campo abierto, donde las fluctuaciones climáticas, las variaciones en la disponibilidad hídrica y el riesgo de lixiviación aumentan la pérdida de nutrientes, limitando el potencial productivo de las cucurbitáceas (Zarei, Kazemi y Marzban, 2019). Asimismo, las diferencias en la composición fisicoquímica del suelo y en la dinámica de mineralización de los biosólidos aplicados pueden haber reducido la disponibilidad efectiva de nutrientes en comparación con los sistemas controlados de invernadero.



**Figura 2. Rendimiento promedio de frutos de pepino (*Cucumis sativus*) en la cosecha precoz, en función de las dosis de biosólidos de tilapia roja (*Oreochromis* sp.) y camarón (*Penaeus vannamei*) (6 y 8 g).
Figure 2. Average fruit yield of cucumber (*Cucumis sativus*) from early harvest as a function of red tilapia (*Oreochromis* sp.) and shrimp (*Penaeus vannamei*) biosolid doses (6 and 8 g).**

Por lo tanto, los menores rendimientos observados no necesariamente reflejan una menor eficiencia de los biosólidos utilizados, sino las limitaciones inherentes al sistema de producción a cielo abierto, ampliamente documentadas en estudios comparativos entre ambientes protegidos y no protegidos.

En estudios relacionados, Farrant, Frank y Larsen (2021) demostraron que los abonos elaborados a partir de desechos de pescado constituyen una enmienda adecuada para suelos en sistemas hortícolas orgánicos. En tomate, los rendimientos obtenidos con fertilización orgánica oscilaron entre 1.3 y 1.8 kg planta⁻¹, ligeramente inferiores a los registrados con fertilización mineral (2.2-2.8 kg planta⁻¹), aunque las parcelas con abonos orgánicos demostraron una buena disponibilidad de nutrientes desde etapas tempranas. Por otra parte, en sistemas acuapónicos, el rendimiento del tomate mostró incrementos asociados a la densidad de peces: 0.77 kg planta⁻¹ con 40 peces m⁻³, 1.46 kg planta⁻¹ con 120 peces m⁻³ y 2.56 kg planta⁻¹ con 80 peces m⁻³ (Villalobos y González, 2016), lo cual evidencia la importancia de la carga nutricional proveniente de residuos acuícolas.

En conjunto, la evidencia disponible respalda que la aplicación de biosólidos acuícolas puede contribuir al rendimiento de cultivos como el pepino al mejorar la fertilidad del suelo y aportar nutrientes esenciales (Ramesh et al., 2020). Además, estas prácticas se alinean con los principios de la agricultura sostenible, que promueve sistemas productivos no degradantes, capaces de mantener la fertilidad del suelo, asegurar la rentabilidad y garantizar la salud del consumidor (Zambrano y Lima, 2023).

Los resultados indican que los biosólidos provenientes de tilapia roja, especialmente en la dosis de 8 g, registraron un desempeño agronómico superior al observado con los biosólidos de camarón. Esta diferencia se explica por las propiedades bioquímicas y microbiológicas contrastantes entre ambos materiales. En sistemas de agua dulce, los biosólidos presentan relaciones C/N más equilibradas, condición que favorece tasas de mineralización más altas y, con ello, una mayor disponibilidad de nitrógeno para los cultivos (Thi Da et al., 2020; Sele et al., 2024). Por el contrario, los biosólidos generados en estanques camaroneros, sometidos a ambientes salobres, tienden a acumular materia orgánica más recalcitrante y concentraciones elevadas de sales solubles, factores que reducen la eficiencia de mineralización y pueden generar efectos osmóticos negativos en el suelo (Pueppke, Nurtazin y Ou, 2020).

Adicionalmente, los biosólidos de tilapia roja aportan mayores concentraciones de micronutrientes esenciales, como Fe, Mn y Zn, necesarios para funciones metabólicas y para el desarrollo vegetativo. En contraste, los sedimentos camaroneros se caracterizan por altos contenidos de Na⁺ y Cl⁻, elementos que pueden interferir con los mecanismos de absorción nutrimental (Tesfaye, Tesfau, Abebe y Waritu, 2024; Khawar et al., 2024). Estas diferencias se complementan con la composición microbiana: los sedimentos asociados a tilapia roja albergan comunidades microbianas más diversas y funcionales, con presencia de bacterias nitrificantes y solubilizadoras de fósforo activas bajo baja salinidad. En los sistemas camaroneros, la salinidad restringe la abundancia y actividad de estos grupos funcionales (Shen, Xu, Li, Zhao y Shao, 2020; Kimbrel et al, 2018).

En conjunto, una relación C/N más favorable, mayor aporte de micronutrientes y un microbiota edáfico más activa explican el mejor desempeño agronómico observado con los biosólidos de tilapia roja frente a los de camarón.

CONCLUSIONES

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos confirmaron que los biosólidos acuícolas tratados son inocuos y aptos para su aplicación agrícola, respaldando su incorporación segura en sistemas de producción hortícola; en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus*), su uso mejoró significativamente las variables agronómicas y productivas frente a la fertilización inorgánica convencional, destacándose el tratamiento con biosólidos provenientes de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) a una dosis de 8 g planta⁻¹, que registró los mayores valores de crecimiento y un rendimiento promedio de 25 000 kg ha⁻¹; en conjunto, estos resultados evidencian el potencial biotecnológico de los biosólidos de tilapia roja y camarón blanco (*Penaeus vannamei*) como biofertilizantes eficaces, capaces de fortalecer la fertilidad del suelo, reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y contribuir a la gestión sostenible de residuos orgánicos en sistemas agrícolas integrados.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

No aplicable.

FINANCIACIÓN

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el apoyo otorgado a través del Fondo Competitivo para la Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 8ª Convocatoria, mediante el proyecto "Uso agrícola de biosólidos de cultivos piscícolas y su efecto en la producción de hortalizas".

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: A.R.A.S.; Metodología: A.R.A.S.; Investigación: J.G.O.V. y A.R.A.S.; Análisis formal: J.G.O.V.; Escritura - preparación del borrador original: J.G.O.V.; Escritura - revisión y edición: A.S.E.; Supervisión: A.S.E.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el apoyo otorgado a través del Fondo Competitivo para la Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 8ª.

LITERATURA CITADA

- Alkharpotly, A. A., Shehata, M. N., & Abd El Rasheed, K. G. (2019). The performance of cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) as affected by organic and NPK mineral fertilization under plastic houses conditions at arid region. *Journal of Plant Production*, 10(7), 551-558.
- Al-Wabel, M. I., Almutari, M. M., Ahmad, M., Al-Swadi, H. A., Ahmad, J., & Al-Farraj, A. S. (2024). Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil health, nutrient availability, and date palm fruit quality. *Scientific Reports*, 14(1), 18634. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68774-0>
- An, N. H., Cho, J. R., Gu, J. S., Kim, Y. K., & Han, E. J. (2017). Effect of fish meal liquid fertilizer application on soil characteristics and growth of cucumber (*Cucumis sativus* L.) for organic culture. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling*, 25(3), 9. <https://doi.org/10.17137/korrae.2017.25.3.13>
- Arumugam, M., Jayaraman, S., Sridhar, A., Venkatasamy, V., Brown, P. B., Abdul Kari, Z., ... & Ramasamy, T. (2023). Recent advances in tilapia production for sustainable developments in Indian aquaculture and its economic benefits. *Fishes*, 8(4), 176.
- Berger, E., Frör, O., & Schäfer, R. B. (2019). Salinity impacts on river ecosystem processes: a critical mini-review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1764). <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0010>
- Bhattacharyya, S. S., Adeyemi, M. A., Onyeneke, R. U., Bhattacharyya, S., Faborode, H. F. B., Melchor-Martínez, E. M., ... & Parra-Saldívar, R. (2021). Nutrient budgeting—a robust indicator of soil-water-air contamination monitoring and prevention. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101944. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101944>
- Cao, T. T., Le, H. A., & Eppe, G. (2025). Nutrient dynamics, environmental impacts, and feed efficiency in intensive whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) farming on sandy soils in Ninh Thuan, Vietnam. *Aquaculture Reports*, 44, 103050. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103050>
- Ch'ng, H. Y., Haruna, A. O., Majid, N. M. N. A., & Jalloh, M. B. (2019). Improving soil phosphorus availability and yield of *Zea mays* L. using biochar and compost derived from agro-industrial wastes. *Italian Journal of Agronomy*, 14(1), 1107. <https://doi.org/10.4081/ija.2019.1107>
- Chen, H., Yi, H., Li, H., Guo, X., & Xiao, B. (2020). Effects of thermal and thermal-alkaline pretreatments on continuous anaerobic sludge digestion: Performance, energy balance and enhancement mechanism. *Renewable Energy*, 147, 2409-2416. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.051>
- Cobos, P. N., Bastidas-Chávez, P. I., & Chuquitarco-Moreno, P. A. (2019). Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 8(2), 30-38. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.1726>
- Drózd, D., Malińska, K., Mazurkiewicz, J., Kacprzak, M., Mrowiec, M., Szczypiór, A., & Stachowiak, T. (2020). Fish pond sediment from aquaculture production—Current practices and the potential for nutrient recovery: a Review. *International Agrophysics*, 34(1), 1-9. <https://doi.org/10.31545/intagr/116394>
- Elgarahy, A. M., Eloffy, M. G., Priya, A. K., Yogeshwaran, V., Yang, Z., Elwakeel, K. Z., & Lopez-Maldonado, E. A. (2024). Biosolids management and utilizations: A review. *Journal of Cleaner Production*, 451, 141974. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141974>
- Emerenciano, M. G., Rombenso, A. N., Vieira, F. D. N., Martins, M. A., Coman, G. J., Truong, H. H., ... & Simon, C. J. (2022). Intensification of penaeid shrimp culture: an applied review of advances in production systems, nutrition and breeding. *Animals*, 12(3), 236.
- Ezziddine, M., Liltved, H., & Homme, J. M. (2020). A method for reclaiming nutrients from aquacultural waste for use in soilless growth systems. *Water Science and Technology*, 81(1), 81-90. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.079>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation*. Rome, Italy: FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Farrant, D. N., Frank, K. L., & Larsen, A. E. (2021). Reuse and recycle: Integrating aquaculture and agricultural systems to increase production and reduce nutrient pollution. *Science of the Total Environment*, 785, 146859. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146859>

- Ferdous, J., Khan, M. N. A., Rahman, M. K., Kamal, M., & Reza, M. S. (2023). Effect of three commonly used aquaculture chemicals against enteropathogenic *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. *Applied Water Science*, 13(4), 96. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01894-6>
- Fernández, C. M., & Quesada-Roldán, G. (2018). Crecimiento y rendimiento del pepino holandés en ambiente protegido y con sustratos orgánicos alternativos. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2), 235-250. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i2.28738>
- Flores-Ramírez, A., Ortega-Cuenca, J., Cuetero-Martínez, Y., de Los Cobos, D., & Noyola, A. (2023). Viability and removal assessment of *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. by real-time PCR with propidium monoazide in the hygienization of sewage sludge using three anaerobic processes. *Waste Management*, 161, 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.019>
- Florez, J. M., Roldán, A. D., Omote, S. J., & Molleda, O. A. (2021). Biofertilizantes y bioestimulantes para uso agrícola y acuícola: Bioprocesos aplicados a subproductos orgánicos de la industria pesquera. *Scientia Agropecuaria*, 17, 1-17. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.067>
- Franco, W. R., Catucúago, C. L., Alvarez, W. G., & Bazantes, K. D. (2021). Uso pecuario intensivo, propiedades químicas del suelo y sostenibilidad en los Andes al norte del Ecuador. *Ciencia del suelo*, 39(1), 79-93.
- Fruscella, L., Kotzen, B., Paradelo-Perez, M., & Milliken, S. (2025). Investigating the effects of fish effluents as organic fertilisers on basil (*Ocimum basilicum*). *Applied Sciences*, 15(3), 1563. <https://doi.org/10.3390/app15031563>
- Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., & Merah, O. (2023). Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, 1(1), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005>
- García-Santiago, J. C., Lozano-Cavazos, C. J., González-Fuentes, J. A., Zermeño-González, A., Rascon Alvarado, E., Rojas Duarte, A., ... & Hernandez Maruri, J. A. (2021). Effects of fish-derived protein hydrolysate, animal-based organic fertilisers and irrigation method on the growth and quality of grape tomatoes. *Biological Agriculture & Horticulture*, 37(2), 107-124.
- Guzmán-Duchen, D., & Montero-Torres, J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 87-101. <https://doi.org/10.53287/uuyxf4027gf99e>
- Hammad, A. M., Eltahan, A., Hassan, H. A., Abbas, N. H., Hussien, H., & Shimamoto, T. (2022). Loads of coliforms and fecal coliforms and characterization of thermotolerant *Escherichia coli* in fresh raw milk cheese. *Foods*, 11(3), 332. <https://doi.org/10.3390/foods11030332>
- Hepsibha, B. T., & Geetha, A. (2019). Physicochemical characterization of traditionally fermented liquid manure from fish waste (Gunapaselam). *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 18(4), 7.
- Huerta, M. E., Cruz-Hernández, J., & Aguirre-Álvarez, L. (2019). La apreciación de abonos orgánicos para la gestión local comunitaria de estiércoles en los traspatios. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29(53), 1-24. <https://doi.org/10.24836/es.v29i53.702>
- Jácome, J., Abad, C. Q., Romero, O. S., Pérez, J. E., & Nirchio, M. (2019). Tilapia en Ecuador: paradoja entre la producción acuícola y la protección de la biodiversidad ecuatoriana. *Revista Peruana de Biología*, 26(4), 543-550. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v26i4.16343>
- Jerônimo, G. T., da Cruz, M. G., Bertaglia, E. D. A., Furtado, W. E., & Martins, M. L. (2022). Fish parasites can reflect environmental quality in fish farms. *Reviews in Aquaculture*, 14(3), 1558-1571. <https://doi.org/10.1111/raq.12662>
- Kaminski, A. M., Cole, S. M., Johnson, J., Thilsted, S. H., Lundeba, M., Genschick, S., & Little, D. C. (2024). Smallholder aquaculture diversifies livelihoods and diets thus improving food security status: evidence from northern Zambia. *Agriculture & Food Security*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00452-2>
- Khawar, M., Masood, Z., Ul Hasan, H., Khan, W., De los Ríos-Escalante, P. R., Aldamigh, M. A., ... & Said, M. B. (2024). Trace metals and nutrient analysis of marine fish species from the Gwadar coast. *Scientific Reports*, 14(1), 6548. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57335-0>
- Hai, L. T., Kien, T. T., & Hung, N. T. (2024). Utilizing sludge from catfish farming to produce vermicompost for improving soil quality. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 1383, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1383/1/012005>
- Kimbrel, J. A., Ballor, N., Wu, Y. W., David, M. M., Hazen, T. C., Simmons, B. A., ... & Jansson, J. K. (2018). Microbial community structure and functional potential along a hypersaline gradient. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1492. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01492>
- Krishnan, S., Chandrakant, M. H., Susitharan, V., & AM, B. R. (2023). Valorisation of aquaculture sludge into microbial protein using bioreactor with an optimised nutrients. *Biochemical Engineering Journal*, 198, 109014. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109014>
- Li, H., Qiu, Y., Yao, T., Ma, Y., Zhang, H., & Yang, X. (2020). Effects of PGPR microbial inoculants on the growth and soil properties of Avena sativa, Medicago sativa, and Cucumis sativus seedlings. *Soil and Tillage Research*, 199, 104577. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104577>
- Liu, X., Wang, Y., Liu, H., Zhang, Y., Zhou, Q., Wen, X., ... & Zhang, Z. (2024). A systematic review on aquaculture wastewater: Pollutants, impacts, and treatment technology. *Environmental Research*, 262, 119793. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119793>
- Lugo-Avilés, L. E., López-Moreno, M. L., Roman-Velazquez, F. R., & Lugo-Rosas, J. (2024). Biosolid Mixtures Applied in Tropical Soils and Their Effect on *Coriandrum sativum* and *Ocimum basilicum* Nutritional Uptake. *Agriculture*, 14(4), 561. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040561>
- Luo, Z., Zhang, Z., Guo, Y., Lv, L., Chen, D., & Duan, J. (2025). Effects of Fish Pond Sediment on Quality of Saline-Alkali Soil and Some Vegetables: Water Spinach, Lettuce, and Chili. *Agronomy*, 15(7), 1670. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071670>
- Maru, A., Haruna, A. O., Asap, A., Majid, N. M. A., Maikol, N., & Jeffary, A. V. (2020). Reducing acidity of tropical acid soil to improve phosphorus availability and Zea mays L. productivity through efficient use of chicken litter biochar and triple superphosphate. *Applied Sciences*, 10(6), 2127. <https://doi.org/10.3390/app10062127>
- Martínez-Rodríguez, Ó. G., Can-Chulim, Á., Ortega-Escobar, H. M., Bojórquez-Serrano, J. I., Cruz-Crespo, E., García-Paredes, J. D., & Madueño-Molina, A. (2021). Fertilidad e índice de calidad del suelo de la cuenca del río San Pedro en Nayarit. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-13. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.766>
- Mehmood, S., Ahmed, W., Mahmood, M., Rizwan, M. S., Asghar, R. M. A., Alatalo, J. M., ... & Shaheen, S. M. (2023). Aquaculture sediments amended with biochar improved soil health and plant growth in a degraded soil. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114899. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114899>
- Miguel, N., Sarasa, J., López, A., Gómez, J., Mosteo, R., & Ormad, M. P. (2020). Study of evolution of microbiological properties in sewage sludge-amended soils: a pilot experience. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6696. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186696>
- Minitab, LLC. (2019). *Minitab Statistical Software (version 19)*. State College, PA, USA: Minitab, LLC.
- Montoya, S. A. M., Mora, A. M., & Vásquez, C. J. F. (2020). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58-68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>
- Muñoz, E. H., & Hernández, J. C. (2018). Valoración de abonos orgánicos en el crecimiento de plantas de geranio y belén. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 4(2), 10, 1-9. <https://doi.org/10.30973/aap/2018.4.2/3>
- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., ... & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591(7851), 551-563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>

- Niswati, A., Sanjaya, B. P., Lumbanraja, J., Arif, M. A. S., Amalia, P., & Yusnaini, S. (2018). Soil fauna population during the maize (*Zea mays* L.) growth with the addition of organonitrophos, inorganic fertilizer and biochar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 215(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/215/1/012003>
- Olaganathan, R., & Kar Mun, A. T. (2017). Impact of aquaculture on the livelihoods and food security of rural communities. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 5(2), 278.
- Padilla, K. C., & Pérez, J. E. (2017). Rendimiento y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivado bajo invernadero. *Pensamiento Actual*, 17(29), 1-12.
- Pérez, J. J. R., Murillo, R. A. L., Bermeo, M. D. R. R., Rosado, Á. J. Y., Pacheco, F. A., Cunuhay, K. A. E., ... & Rodríguez, J. A. T. (2017). Uso del humus de lombriz y jacinto de agua sobre el crecimiento y desarrollo del pepino (*Cucumis sativus*, L). *Biotecnia*, 19(2), 30-35.
- Pérez-San Martín, A., Tortosa, G., González, A., Cayunao, S., & Curaqueo, G. (2024). Drying treatment for sludges of the Chilean salmon farming industry and its potential as an agricultural soil amendment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 70(1), 1-18. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2282590>
- Pis, R. M., Delgado, M. G., Pozo, E. M., Núñez, H. M., Medell, G. M., Rico, I. O., & Manuel, A. Z. (2015). Caracterización del agua y sedimento de una estación de cultivo de *Claria gariepinus* en Cuba. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 16(9), 9.
- Pueppke, S. G., Nurtazin, S., & Ou, W. (2020). Water and land as shared resources for agriculture and aquaculture: Insights from Asia. *Water*, 12(10), 2787. <https://doi.org/10.3390/w12102787>
- Radziemska, M., Vaverková, M. D., Adamcová, D., Brtnický, M., & Mazur, Z. (2019). Valorization of fish waste compost as a fertilizer for agricultural use. *Waste and Biomass Valorization*, 10(9), 2537-2545. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0288-8>
- Ramesh, T., Amuthavalli, A., & Boopathy, R. (2020). Analysis of fermented liquid fertilizer from marine crab waste. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 5(3), 1-7. <https://dx.doi.org/10.22161/ijeab.53.16>
- Rana, H., Sharma, K., & Negi, M. (2020). Effect of organic manure and biofertilizers on plant growth, yield and quality of Sweet orange (*Citrus sinensis* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(4), 7. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.904.247>
- Raza, B., Zheng, Z., & Yang, W. (2024). A review on biofloc system technology, history, types, and future economical perceptions in aquaculture. *Animals*, 14(10), 1489. <https://doi.org/10.3390/ani14101489>
- Rebolledo-Monsalve, E., & Verduga-Vergara, L. (2023). Water and sediment quality changes in mangrove systems with shrimp farms in the Northern Ecuadorean Coast. *Applied Sciences*, 13(13), 7749. <https://doi.org/10.3390/app13137749>
- Reyes-Pérez, J. J., Rivero-Herrada, M., Andagoya Fajardo, C. J., Beltrán-Morales, F. A., Hernández-Montiel, L. G., García Liscano, A. E., & Ruiz-Espinoza, F. H. (2021). Emergencia y características agronómicas del *Cucumis sativus* a la aplicación de quitosano, *Glomus cubense* y ácidos húmicos. *Biotecnia*, 23(3), 38-44. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i3.1427>
- Sáez-Plaza, P., Asuero, A. G., & Martín, J. (2019). Una anotación sobre el método de Kjeldahl. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia*, 85(1), 65-81.
- Sallam, G. R., El Basuini, M. F., Alhoshy, M., Al-Absawey, M. A., Habib, Y. J., Elhetawy, A. I., ... & Shehata, A. I. (2025). Strategic application of Biofloc technology for optimizing physiological homeostasis and reproductive efficiency in red tilapia (*Oreochromis spp.*) broodstock under long-term rearing conditions. *Aquaculture International*, 33(6), 464. <https://doi.org/10.1007/s10499-025-02141-2>
- Schembri, C., Kaczmar, N., Osborn, J., Timmons, M. B., & Mattson, N. S. (2025). Evaluation of Fish Biosolids as a Fertilizer for Organic Tomato Transplant Production. *Horticulturae*, 11(1), 57. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010057>
- Sele, V., Ali, A., Liland, N., Lundebye, A. K., Tibon, J., Araujo, P., ... & Belghit, I. (2024). Characterization of nutrients and contaminants in fish sludge from Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) production sites-A future resource. *Journal of Environmental Management*, 360, 121103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121103>
- Shen, X., Xu, M., Li, M., Zhao, Y., & Shao, X. (2020). Response of sediment bacterial communities to the drainage of wastewater from aquaculture ponds in different seasons. *Science of The Total Environment*, 717, 137180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137180>
- Sonnenholzner, V. J. (2021). ¿Hacia dónde va la acuicultura de equinodermos en América Latina? Potencial, retos y oportunidades. *Revista de Biología Tropical*, 69, 36. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69iSupl.1.46393>
- Sori, G., Iticha, B., & Takele, C. (2021). Spatial prediction of soil acidity and nutrients for site-specific soil management in Bedele district, Southwestern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 10(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00334-5>
- Soto, A., Rivera, M., Gonzalez, P., & Ayala, I. (2019). Análisis Microbiológico de Biosólidos para su aprovechamiento en cultivos de tallo corto. *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología*, 03(07), 1-8.
- Sun, K., Fu, L., Song, Y., Yuan, L., Zhang, H., Wen, D., ... & Wang, K. (2021). Effects of continuous cucumber cropping on crop quality and soil fungal community. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7), 436. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09136-5>
- Tambi, A., Brighu, U., & Gupta, A. B. (2023). Methods for detection and enumeration of coliforms in drinking water: a review. *Water Supply*, 23(10), 4047-4058. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.247>
- Terraza, S. P., Terán, G. E., Carrasco, W. R., & Verdugo, S. H. (2017). Relación NO₃-/K⁺ en la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de pepino hidropónico* RNO₃-/K⁺ ratioin nutrient solution on growth and yield of hydroponic cucumber. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(6), 1-12. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i6.201>
- Tesfaye, T., Tesfau, H., Abebe, D., & Waritu, H. (2024). Assessment of trace metal levels in water, sediment and fish tissue from Lake Small Abaya, Ethiopia. *Discover Environment*, 2(1), 124. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00159-6>
- Thanh, D. T., Ty, N. M., Hien, N. V., Berg, H., Nguyen, T. K. O., Vu, P. T., ... & Da, C. T. (2023). Effects of organic fertilizers produced from fish pond sediment on growth performances and yield of Malabar and Amaranthus vegetables. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1045592. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1045592>
- Thi Da, C., Anh Tu, P., Livsey, J., Tang, V. T., Berg, H., & Manzoni, S. (2020). Improving productivity in integrated fish-vegetable farming systems with recycled fish pond sediments. *Agronomy*, 10(7), 1025. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071025>
- Van Tung, T., Tran, Q. B., Thao, N. T. P., Vi, L. Q., Hieu, T. T., Le, S., ... & Van Le, Q. (2021). Recycling of aquaculture wastewater and sediment for sustainable corn and water spinach production. *Chemosphere*, 268, 129329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129329>
- Villalobos, R. S., & González, P. E. (2016). Determinación de la relación pez planta en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) en sistema de acuaponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 11.
- Wang, T., Jiao, Y., He, M., Ouyang, W., Lin, C., & Liu, X. (2022). Facile co-removal of As (V) and Sb (V) from aqueous solution using Fe-Cu binary oxides: Structural modification and self-driven force field of copper oxides. *Science of The Total Environment*, 803, 150084.
- Wankanapol, A., Chaibu, P., & Soonthornvipat, S. (2017). Evaluation of Different Carbon Sources for Biofloc Production in Tilapia (*Oreochromis niloticus*, L) Culture. *Science, Engineering and Health Studies*, 11(3), 445-452. <https://doi.org/10.14456/sustj.2017.9>

- Xia, Y., Feng, J., Zhang, H., Xiong, D., Kong, L., Seviour, R., & Kong, Y. (2024). Effects of soil pH on the growth, soil nutrient composition, and rhizosphere microbiome of *Ageratina adenophora*. *PeerJ*, 12, e17231. <https://doi.org/10.7717/peerj.17231>
- Yusuf, A. G., Al-Yahya, F. A., Saleh, A. A., & Abdel-Ghany, A. M. (2025). Optimizing greenhouse microclimate for plant pathology: challenges and cooling solutions for pathogen control in arid regions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1492760. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1492760>
- Zambrano-Gavilanes, F., & Lima-Moncayo, A. O. (2023). Uso de fertilizantes orgánicos en la producción de Cucurbitáceas: revisión de literatura. *Paideia XXI*, 13(1), 141-159. <https://doi.org/10.31381/paideia.v13i1.5671>
- Zarei, M. J., Kazemi, N., & Marzban, A. (2019). Life cycle environmental impacts of cucumber and tomato production in open-field and greenhouse. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(3), 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.07.001>
- Zhou, S., Chang, T., Zhang, Y., Shaghaleh, H., Zhang, J., Yang, X., ... & Hamoud, Y. A. (2024). Organic fertilizer compost alters the microbial composition and network structure in strongly acidic soil. *Applied Soil Ecology*, 195, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105263>