

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**  
**ESCUELA DE CIENCIAS PECUARIAS**

**EFFECTO DE LA TECNOLOGÍA ACUAPÓNICA SOBRE VARIABLES DE  
INTERÉS ZOTÉCNICO Y BIENESTAR ANIMAL EN FENOTIPOS DE  
COMPORTAMIENTO DE TILAPIA DEL NILO.**

**NOHELLYS N. DE LISSER C.**

**4-805-1737**

**DAVID, CHIRIQUÍ**  
**REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2024**

**EFFECTO DE LA TECNOLOGÍA ACUAPÓNICA SOBRE VARIABLES DE  
INTERÉS ZOOTÉCNICO Y BIENESTAR ANIMAL EN FENOTIPOS DE  
COMPORTAMIENTO DE TILAPIA DEL NILO.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE CIENCIAS PECUARIAS**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL  
DEBE SER OBTENIDO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**APROBADO:**

**DR. REYNALDO VARGAS**

---

**ASESOR**

**DR. ALEX SOLÍS**

---

**MIEMBRO**

**DR. REGGIE GUERRA**

---

**MIEMBRO**

**DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2024**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios, quien ha sido mi guía constante y fuente de fortaleza durante mi trayectoria académica.

A mi mamá, Hermelinda Cascante, cuyo amor incondicional, oraciones y palabras de apoyo inquebrantable han sido mi motivación constante.

A mi padre, Lionel De Lisser, por ser mi ejemplo de perseverancia. Su constancia y dedicación me han enseñado el valor del esfuerzo y trabajar duro por lo que se desea.

A mi querido hermano, Lionel, por su complicidad en cada paso de esta investigación.

Y a mi abuela, Domitila, cuyo cariño y sabios consejos siempre han iluminado mi camino.

## **Agradecimiento**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en la realización de esta investigación.

En primer lugar, a mi familia, quienes han sido mi mayor apoyo y motivación en cada paso de esta trayectoria. A mi madre, Hermelinda Cascante, y mi padre, Lionel De Lisser, por su amor incondicional y constante aliento. A mi hermano, Lionel, por ser mi compañero de vida y por estar siempre presente en cada desafío.

Agradezco enormemente a mi asesor de tesis, Reynaldo Vargas, por su orientación experta, paciencia y dedicación, que han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de este proyecto y por todo lo que me ha enseñado durante mi periodo universitario. También, mi gratitud hacia el profesor Carlos Solís, Reggie Guerra y Alex Ríos por sus valiosas contribuciones y orientación en la investigación.

Al personal del programa avícola, José Madrid, Randol Fonseca y Oscar Franco, les agradezco por su colaboración y asistencia en la investigación. Su conocimiento y experiencia fueron de gran ayuda para alcanzar los objetivos planteados.

A mis amigos Paola Pérez, Luis Castro, Nicolás Esquivel, Gladys Gonzáles, José Gonzáles, Stephany Monroy, Andrick Camaño, Richard Acosta, José L.} y a todos aquellos que de alguna forma me han ayudado, les doy las gracias por su sincera amistad y por sus valiosas contribuciones en la investigación.

También, agradezco a los colaboradores del programa porcino, al señor Luis Miranda del programa apícola, y a los colaboradores del programa de cría y ceba, cuya colaboración fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento. Este logro también es suyo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEORICO .....	3
2.1 Antecedentes de investigación.....	3
2.2. Descripción de un sistema acuapónico .....	3
2.2.1. Descripción de los componentes de un sistema acuapónico.....	3
2.2.2. Tanque de cultivo .....	3
2.2.3. Sistema de filtración .....	4
2.2.4. Filtración mecánica .....	4
2.2.5. Filtración biológica .....	5
2.2.6. Bacterias nitrificantes .....	5
2.3. Descripción general de la tilapia del Nilo.....	6
2.3.1. Morfología externa .....	7
2.3.2. Distribución mundial de la tilapia del Nilo .....	8
2.3.3. Nutrición.....	8
2.3.4. Producción.....	8
2.4. Parámetros de calidad de agua para la tilapia en sistemas acuapónicos ...	10
2.4.1. Temperatura .....	10
2.4.2. Oxígeno disuelto .....	10
2.4.3. pH .....	11
2.4.4. Conductividad eléctrica .....	11
2.4.5. Sólidos disueltos totales.....	12
2.4.6. Amoníaco .....	12
2.4.7. Nitrito .....	12
2.4.8. Nitrato .....	13

2.5. Maíz en sistemas acuapónicos .....	13
2.5.1. Antecedentes .....	13
2.5.2. Ciclo del nitrógeno y proceso de nitrificación.....	14
2.6. Variables de interés zootécnico.....	14
2.6.1. Comportamiento.....	14
2.6.2. Peso.....	16
2.6.3. Longitud .....	16
2.7. Fenotipo de comportamiento .....	16
2.8. Bienestar animal .....	17
III. MATERIALES Y METODOS.....	18
3.1 Objetivos.....	18
3.1.2. Objetivo general .....	18
3.1.3. Objetivos específicos .....	18
3.2. Hipótesis .....	18
3.2.1. Hipótesis (o):.....	18
3.2.3. Hipótesis (a):.....	18
3.3. Ubicación geográfica .....	19
3.4. Trabajo de campo .....	19
3.4.1 Alojamiento .....	19
3.4.2. Especie, población, aclimatación y alimentación .....	20
3.5. Selección de los fenotipos .....	20
3.6. Sistemas .....	21
3.5. Tratamientos .....	22
3.7. Maíz.....	22
3.8. Parámetros fisicoquímicos del agua.....	23

3.8.1. Temperatura .....	23
3.8.2. Oxígeno disuelto .....	23
3.8.3. pH .....	24
3.8.4. Conductividad eléctrica .....	24
3.8.5. Solidos disueltos totales (TDS) .....	24
3.8.6. Amoníaco .....	24
3.8.7. Nitrito .....	25
3.8.8. Nitrato .....	26
3.9. Indicadores de comportamiento .....	26
3.9.1. Prueba de actividad .....	26
3.9.2. Latencia para entrar a la primera zona (LPZ) .....	27
3.9.3. Número de transiciones (NT) .....	27
3.9.4. Congelamiento .....	27
3.10. Variables de estrés.....	27
3.10.1. Frecuencia ventilatoria .....	27
3.10.2. Glucosa.....	27
3.11. Variable de bienestar animal .....	28
3.11.1. Daño de aleta .....	28
3.12. Variables zootécnicas .....	28
3.12.1. Peso.....	28
3.12.2. Longitud .....	28
3.13. Análisis estadístico.....	29
IV. RESULTADOS .....	30
4.1. Variables fisicoquímicas .....	30
4.1.1. Temperatura .....	30

4.1.2. Oxígeno disuelto .....	30
4.1.3. pH .....	30
4.1.4. Total, de solidos disueltos.....	31
4.1.5. Conductividad eléctrica .....	31
4.1.6. Amoniacó .....	31
4.1.7. Nitrito .....	31
4.1.8. Nitrato .....	32
4.2. Indicadores de comportamiento .....	32
4.2.1. Prueba de Actividad .....	32
4.2.2. Latencia primera zona (LPZ) .....	32
4.2.3. Tiempo de congelamiento .....	32
4.2.4. Número de Transiciones .....	32
4.3. Prueba de restricción .....	34
4.3.1. Latencia para el primer movimiento (LPM) .....	34
4.3.2. Número Total de Movimientos .....	35
4.4. Indicadores de estrés.....	37
4.4.1. Frecuencia ventilatoria .....	37
4.4.2. Glucosa.....	38
4.5. Bienestar animal .....	38
4.5.1. Erosión de Aleta dorsal .....	38
4.6. Variables Zootécnicos .....	39
4.6.1. Peso.....	39
4.6.2. Longitud total .....	39
V. DISCUSIÓN .....	40
VI. CONCLUSIONES .....	46

VII. RECOMENDACIONES.....	47
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
IX. ANEXOS.....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de transiciones ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción. ....	33
Tabla 2. Número total de movimientos ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción. ....	36
Tabla 3. Frecuencia ventilatoria ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción. ....	37
Tabla 4. Erosión de aleta dorsal ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción. ....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología externa de la tilapia del Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ). .....	7
Figura 2. a) Producción de tilapia del año 2010 a 2020 de los principales productores a nivel mundial, b) Producción mundial de tilapia del año 1993 a 2021.....	9
Figura 3. Ubicación geográfica de la investigación.....	19
Figura 4. Croquis de la distribución de tratamientos y repeticiones de la investigación. ....	21
Figura 5. Imagen de la distribución de los tratamientos y repeticiones.....	22
Figura 6. Media $\pm$ D.E., de oxígeno disuelto en mg/L. * $p < 0.05$ .....	30
Figura 7. Media $\pm$ D.E., de nitrito en mg/L. ** $p < 0.01$ . ....	31
Figura 8. Media $\pm$ D.E., de número de transiciones. ** $p < 0.01$ , *** $p < 0.001$ . ....	34
Figura 9. Media $\pm$ D.E., de latencia primer movimiento. * $p < 0.05$ . ....	35
Figura 10. Desarrollo del sistema radicular del maíz a los dieciocho días en el sistema acuapónico. ....	60
Figura 11. Desarrollo del sistema radicular del maíz a los siete días en el sistema acuapónico. ....	60
Figura 12. Kits de etiquetas implante visible tipo elastómero (VIE). ....	60
Figura 13. Marcación de peces proactivos. ....	60
Figura 14. Reactivo utilizado en la prueba de amonio de los parámetros fisicoquímicos del agua. ....	61
Figura 15. Reactivo utilizado en la prueba de nitrito de los parámetros fisicoquímicos del agua. ....	61
Figura 16. Reactivo utilizado en la prueba de nitrato de los parámetros fisicoquímicos del agua. ....	61
Figura 17. Extracción de glucosa. ....	61
Figura 18. Prueba de frecuencia ventilatoria. ....	62
Figura 19. Prueba de actividad. ....	62
Figura 20. Observación de daño en la aleta dorsal. ....	62

## RESUMEN

El presente estudio evaluó el efecto de la tecnología acuapónica en los parámetros fisicoquímicos del agua, variables zootécnicas y de bienestar animal en fenotipos de comportamiento de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), realizado en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, provincia de Chiriquí, Panamá. Se seleccionaron 96 alevines de tilapia según su fenotipo (reactivo y proactivo). El estudio comparó un sistema cerrado de flujo continuo y sistema acuapónico de recirculación a iguales densidades de 16 peces/tanque (T1 y T2 respectivamente). Se utilizaron tanques de 350 litros de volumen útil. Los resultados revelaron diferencias significativas entre los sistemas acuapónico y cerrado de flujo continuo en oxígeno disuelto ( $U = 446.00$ ;  $p < 0.05$ ) y nitrito ( $U = 380.00$ ;  $p < 0.05$ ), siendo más favorables en el sistema acuapónico. No se encontraron diferencias significativas en el pH, sólidos disueltos totales, temperatura ni amoníaco entre ambos sistemas. En cuanto a los fenotipos de comportamiento, se observó una diferencia significativa en la interacción sistema fenotipo de comportamiento reactivo ( $p < 0.05$ ), pero no entre los sistemas. Se observó diferencia significativa en la latencia para el primer movimiento. Los resultados indicaron diferencias significativas entre los fenotipos de comportamiento ( $p < 0.05$ ), pero no entre los sistemas evaluados. Respecto al bienestar animal, no se encontraron diferencias significativas en la erosión de aleta dorsal ni en los niveles de glucosa en sangre entre los sistemas o fenotipos de comportamiento. Tampoco se observaron diferencias significativas en el peso ( $U = 121.00$ ;  $p = 0.20$ ) ni en la longitud ( $U = 155.00$ ;  $p = 0.83$ ) entre los sistemas. En conclusión, aunque la tecnología acuapónica demostró ventajas en parámetros fisicoquímicos específicos, no se encontraron diferencias significativas en el comportamiento, bienestar animal ni variables zootécnicas entre los sistemas acuapónicos y cerrados de flujo continuo para la cría de tilapia del Nilo en las condiciones experimentales evaluadas.

**Palabras claves:** Acuaponía, estrés, fenotipo de comportamiento, parámetros fisicoquímicos, peces.

## ABSTRACT

This study evaluated the effect of aquaponic technology on water physicochemical parameters, zootechnical variables, and animal welfare in behavior phenotypes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), conducted at the Faculty of Agricultural Sciences, Chiriquí Province, Panama. A total of 96 tilapia juveniles were selected based on their phenotype (reactive and proactive). The study compared a closed continuous flow system and a recirculating aquaponic system, both with equal densities of 16 fish per tank (T1 and T2, respectively), using tanks with a 350-liter working volume. The results revealed significant differences between the aquaponic and closed continuous flow systems in dissolved oxygen ( $U = 446.00$ ;  $p < 0.05$ ) and nitrite ( $U = 380.00$ ;  $p < 0.05$ ), with more favorable levels in the aquaponic system. No significant differences were found in pH, total dissolved solids, temperature, or ammonia between the two systems. Regarding behavior phenotypes, a significant difference was observed in the interaction between system and reactive behavior phenotype ( $p < 0.05$ ), but not between the systems. A significant difference was also observed in latency to first movement, with results indicating significant differences between behavior phenotypes ( $p < 0.05$ ), but not between the systems evaluated.

Regarding animal welfare, no significant differences were found in dorsal fin erosion or blood glucose levels between the systems or behavior phenotypes. Similarly, no significant differences were observed in weight ( $U = 121.00$ ;  $p = 0.20$ ) or length ( $U = 155.00$ ;  $p = 0.83$ ) between the systems. In conclusion, although aquaponic technology demonstrated advantages in specific physicochemical parameters, no significant differences were found in behavior, animal welfare, or zootechnical variables between the aquaponic and closed continuous flow systems for Nile tilapia farming under the experimental conditions evaluated.

**Keywords:** Aquaponics, stress, behavior phenotype, physicochemical parameters, fish.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la acuicultura al pasar de los años ha desencadenado una fuerte competencia por los recursos hídricos y el deterioro de las aguas en el sistema de producción tradicional debido a la gran cantidad de desechos generados. Como consecuencia puede ocasionar la salinización y acidificación de los suelos donde se realice la actividad. Esta problemática ha permitido que se implementen sistemas más sostenibles como es el caso de la acuaponía, que de acuerdo con Ulloa *et al.*, (2005), el sistema de recirculación acuapónico es una tecnología prometedora, que puede definirse como un sistema de producción de alimentos que incorpora dos o más componentes (peces y vegetales o plantas) en un diseño basado en la recirculación de agua lo que resulta muy útil en zonas donde la disponibilidad de esta es escasa (Tyson *et al.*, 2004; 2007; Dediu *et al.*, 2012).

Los peces criados bajo sistemas de producción que se encuentren en excelentes condiciones, tanto que se puede llegar a considerar como un animal “feliz”, adquieren un mejor desempeño productivo en cuando a términos de crecimiento con una mayor eficiencia en la conversión de alimento y una menor pérdida de animales lo que da como resultado una ganancia económica para el productor (Bravo, 2019).

El incremento de las actividades de acuaponía ha generado investigaciones en aspectos relacionados con el bienestar de las especies utilizadas, debido a que factores estresantes repercuten en la salud y rendimiento de los animales, provocando un aumento en las tasas de infecciones por patógenos, viéndose reflejado en el peso de los animales afectando directamente la productividad y rentabilidad de esta actividad. Manteniendo el bienestar de los peces obtendremos productos de mejor calidad, y aceptación de parte del consumidor (Hernández, 2019).

Por otro lado, el número de investigaciones afirmando el papel de la variación individual consistente en respuesta de comportamiento se ha incrementado notoriamente (MacKenzie *et al.*, 2009). La selección por fenotipo de comportamiento ha demostrado tener implicaciones en rasgos productivos de interés para la acuicultura (Huntingford *et al.*, 2010). En la literatura especializada los fenotipos de comportamientos son referidos como proactivos o reactivos (Koolhaas *et al.*, 1999), mostrando diferencias en la eficiencia alimenticia, en la motivación para alimentarse y en la disposición para explorar ambientes nuevos (Martins *et al.*, 2005; Øverli *et al.*, 2007; Millot *et al.*, 2009).

Se busca abordar los desafíos relacionados con la eficiencia del uso de recursos hídricos y la sostenibilidad en la producción agrícola. Como alcances de esta investigación, se propone aumentar la eficiencia en la utilización del recurso hídrico, empleando menos del 90% de agua en comparación con la agricultura convencional, reutilizar contaminantes como nutrientes y reducir la presión de urbanización sobre la tierra al requerir menos área (Abusin y Mandikiana, 2020). Utilizando la técnica de sistemas de recirculación (RAS) tradicional, y un sistema acuapónico, donde las plantas se cultivarán en perfiles específicos, maximizando la absorción de nutrientes para la producción conveniente de la biomasa vegetal, pero sin comprometer las condiciones de bienestar para los peces en términos de calidad del agua y enfermedades que se puedan propagar.

Entre las principales limitantes de la investigación propuesta está determinar las relaciones adecuadas de plantas/peces que generen la mayor tasa de remoción de sólidos en suspensión, amoníaco  $\text{NH}_3^+$  y el nitrito  $\text{NO}_2^-$  y otras formas de nitrógeno que pueden afectar el desempeño productivo del sistema.

Es por ello por lo que en esta investigación se plantea como objetivo evaluar variables zootécnicas y de bienestar animal en fenotipos de comportamiento de tilapia del Nilo en acuaponía.

## **II. MARCO TEORICO**

### **2.1 Antecedentes de investigación**

En la década del 70, se demostró que los desechos metabólicos que los peces generaban podían ser utilizados para el cultivo de plantas, en forma hidropónica (Lewis *et al.*, 1978). Sin embargo, no fue sino hasta la década del 90 que se empezaron a obtener datos concretos aplicables a producciones comerciales. En los primeros ensayos de acuaponía, se utilizaron lechos ocupados con diferentes sustratos, como arena (Lewis *et al.*, 1978) o grava (Rakocy, 1999).

### **2.2. Descripción de un sistema acuapónico**

En los sistemas acoplados se caracterizan por un flujo continuo entre las unidades hidropónicas y acuícolas, es decir el agua con desechos que proviene de los tanques es recirculada hacia los filtros para el tratamiento de sólidos y lodos, luego es conducida hacia los módulos hidropónicos para facilitar la absorción de los nutrientes y finalmente el agua con menos partículas disueltas es devuelta hacia los tanques de cultivo de los peces (García *et al.*, 2021).

Muñoz (2012), menciona que estos sistemas tienen muchas ventajas en comparación con sistemas hidropónicos y sistemas de recirculación convencionales aislados, una de estas es que se utiliza los desechos generados en el cultivo de organismos acuáticos el cual es un problema en la producción.

#### **2.2.1. Descripción de los componentes de un sistema acuapónico**

##### **2.2.2. Tanque de cultivo**

Es el componente esencial para cualquier sistema acuícola debido a que es el medio donde se desarrollan los peces, el diseño de los tanques debe ser adecuado según la especie de cultivo, estos se clasifican en función de su geometría. Los tanques circulares permiten mantener uniformidad de las concentraciones de oxígeno evitando zonas muertas, además facilita la limpieza de los desechos generados por los peces debido a que permite mantener un flujo constante de recambio (Baradad Oca y Llorà 2009).

### **2.2.3. Sistema de filtración**

La filtración es de uno de los componentes más importantes en la acuaponía debido a que permite mantener el control de los desechos tóxicos para los peces, así mismo influye en procesos oxidación y remoción de sólidos, no obstante, estos mecanismos de filtración provienen de técnicas de recirculación SRA (sistemas de recirculación para la acuicultura). Existen diferentes métodos de filtración mecánica donde se incluyen tanques de sedimentación, clarificador, filtro de arena y filtros deflectores, sin embargo, para unidades acuapónicas a pequeña escala específicamente en técnicas NFT por sus siglas en inglés (Nutrient Film Technique), y DWC también conocido en inglés como (Deep water culture), recomienda implementar tanques calificadores (sedimentadores) y filtros mecánicos (FAO, 2014).

### **2.2.4. Filtración mecánica**

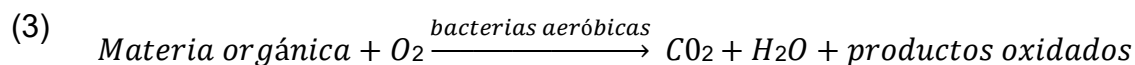
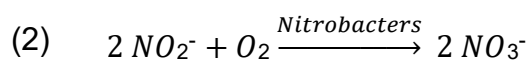
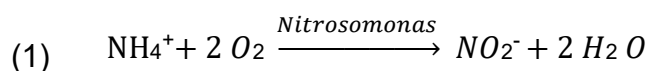
Esta técnica de filtración permite separar todos los sólidos particulados en suspensión de diferentes tamaños que van desde micras ( $\mu\text{m}$ ) a centímetros (cm), principalmente compuestos de materia fecal o restos de alimentos que son menos densos que el agua lo que impide que se precipiten (Candarle, 2011).

Merino y Sal (2007), mencionan que existen diferentes tipos de filtros mecánicos que implementan un alto nivel tecnológico, alto costo y requiere de conocimiento para su operación, los filtros se clasifican de acuerdo con la eficiencia en el filtrado de partículas finas. Como ejemplo filtros que implementan cribas fijas o filtros de tambor con cribas rotatoria, estos filtros pueden retener partículas mayores a 1.5 mm de diámetro

Sin embargo, para modelos acuapónicos a pequeña escala existen métodos más simples y económicos para atrapar sólidos dentro de un filtro biológico, este método de filtración mecánica consiste en insertar un recipiente cilíndrico perforado lleno con esponjas y grava dentro del biofiltro para que los sólidos puedan ser retenidos permitido el flujo de agua filtrada hacia el filtro biológico (FAO, 2014).

### 2.2.5. Filtración biológica

El filtro biológico, es un contenedor que concentra la comunidad bacteriana del SRA, para biodegradar la materia orgánica (heces de las tilapias y residuos de comida) con las bacterias aeróbicas y posteriormente transformar el nitrógeno amoniacal ( $N - NH_3$ ) y el amonio ( $NH_4^+$ ) ionizado soluble en el agua a nitrito ( $NO_2^-$ ) y luego a nitrato ( $NO_3^-$ ) para que de esta manera sea más accesible para las plantas. Ese proceso se llama nitrificación y se da con dos tipos de bacterias, unas que oxidan (género *Nitrosomas*) el amoniaco ( $NH_3$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ) presente en la materia orgánica ( $N - NH_3$ ) del agua a  $NO_2^-$  (ver ecuación 1) y otras (género *Nitrobacter*) que convierten el  $NO_2^-$  en  $NO_3^-$  (Somerville *et al.*, 2014), (ver ecuación 2). Ambas bacterias son quimiolitótrofas, es decir, obtienen la energía mediante la oxidación de los compuestos inorgánicos reducidos ( $NH_4^+$ ,  $NH_3$ ,  $NO_2^-$ ), no necesitan luz y utilizan el  $CO_2$  como fuente de carbono (Espino, 2003). Sin embargo, son las bacterias aeróbicas heterótrofas las que primeramente descomponen la materia orgánica consumiendo oxígeno en el proceso para luego dar paso a la nitrificación y así lograr disminuir los sólidos suspendidos en el agua (Vyzamal, 2005). Este proceso de biodegradación de la materia orgánica realizado por las bacterias aeróbicas en el sistema (ver ecuación 3).



En la biofiltración, se dispone de una amplia gama de materiales para su uso como sustrato de superficie. Estos materiales pueden incluir biobolas, tapas de plástico, mallas de nailon, entre otros (FAO, 2014).

### 2.2.6. Bacterias nitrificantes

Los organismos aerobios conocidos como bacterias nitrificantes obtienen energía para su metabolismo mediante la oxidación de compuestos nitrogenados reducidos,

como el amoníaco y el nitrito (FAO, 2014). En los sistemas acuapónicos, se encuentran grupos específicos asociados al ciclo del nitrógeno, entre ellos especies del género *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*.

Estos organismos llevan a cabo la oxidación o transformación del amoníaco en nitritos y nitratos mediante procesos de respiración celular, utilizando oxígeno molecular O<sub>2</sub> como oxidante, donde la nitrificación depende estrictamente de la presencia de oxígeno y es realizada por un grupo de bacterias quimioautótrofas de crecimiento lento (Cervantes *et al.*, 2000), que pueden ser inhibidas por las condiciones ambientales extremas del sistema (oxígeno disuelto, metales pesados, pH, temperatura y otras) (Ye y Thomas, 2001).

### **2.3. Descripción general de la tilapia del Nilo**

La tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus*, presenta un cuerpo alargado y oblongo, con una cabeza relativamente pequeña. Se caracteriza por tener rayas verticales regulares en la aleta caudal y una mandíbula inferior muy protráctil. En los machos maduros, esta mandíbula alargada resulta en una cabeza cóncava. Las branquiespinas son simples, con 20-21 en las inferiores. Presenta una aleta dorsal sin hendidura entre las espinas y los radios, con radios blandos más largos que llegan hasta la base de la cola en las hembras y hasta tres cuartas partes de la cola en los machos. El número de espinas dorsales varía entre 15 y 18, con 11 - 13 radios blandos dorsales, mientras que las espinas anales son 3 y los radios blandos anales oscilan entre 9 y 11 (Robertson *et al.*, 2019; Froese y Pauly, 2023). Esta especie puede alcanzar una longitud estándar de hasta 60 *cm* y un peso de 4.3 Kg (Froese y Pauly, 2023).

Las hembras y los machos no maduros presentan un color gris plateado, a veces con barras oscuras poco visibles, y una mancha oscura en la esquina superior del opérculo. Además, la aleta caudal muestra entre 7 y 12 barras oscuras estrechas. Por otro lado, los juveniles tienen un lunar oscuro bordeado de blanco en la base de los primeros radios blandos dorsales, así como nueve barras oscuras en el cuerpo y una mancha oscura en el opérculo. Por último, los machos maduros muestran un

cuerpo y aletas grises con tintes rojizos en la cabeza, cola y frente de la dorsal (Robertson *et al.*, 2019).

### 2.3.1. Morfología externa

La morfología (figura 1) presenta un solo orificio nasal a cada lado de la cabeza, que sirve simultáneamente como entrada y salida de la cavidad nasal. El cuerpo es generalmente comprimido y discoidal, raramente alargado. La boca es protráctil, generalmente ancha, a menudo bordeada por labios gruesos; las mandíbulas presentan dientes cónicos y en algunas ocasiones incisivos. Para su locomoción poseen aletas pares e impares. Las aletas pares las constituyen las pectorales y las ventrales; las impares están constituidas por las aletas dorsales, la caudal y la anal. La parte anterior de la aleta dorsal y anal es corta, consta de varias espinas y la parte terminal de radios suaves, disponiendo sus aletas dorsales en forma de cresta. La aleta caudal es redonda, trunca y raramente cortada, como en todos los peces, esta aleta le sirve para mantener el equilibrio del cuerpo durante la natación y al lanzarse en el agua (Saavedra, 2006).

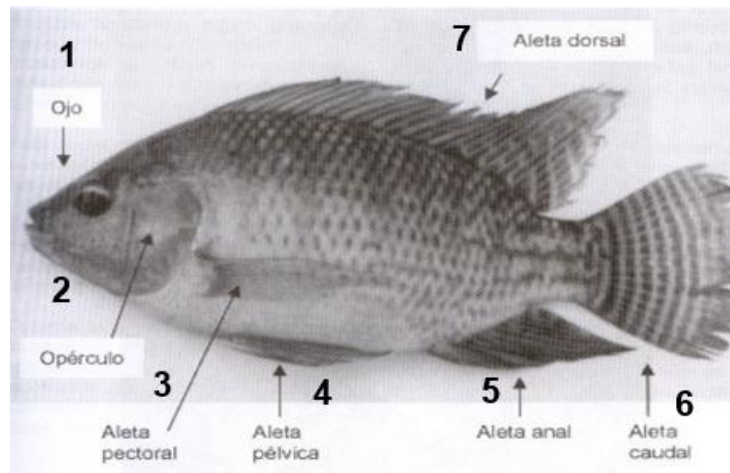


Figura 1. Morfología externa de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*).

Fuente: Saavedra, (2006).

Descripción de los puntos de referencia.1. Parte superior del ojo, 2. Borde más posterior del opérculo, 3. Base de la aleta pectoral, 4. Base caudal de la aleta

pélvica, 5. Base anterior de la aleta anal, 6. Base de la aleta caudal, 7. Base superior de aleta dorsal.

### **2.3.2. Distribución mundial de la tilapia del Nilo**

La tilapia nilótica, es originaria de África, donde se encuentra de forma endémica en regiones como Jordania e Israel. Su diseminación tuvo lugar principalmente durante las décadas de 1960 y 1980. Por ejemplo, se introdujo por primera vez en Tailandia en 1965 desde Japón, y posteriormente se trasladó a Filipinas desde allí. Del mismo modo, ejemplares procedentes de Costa de Marfil llegaron a Brasil en 1971, y de allí se enviaron a Estados Unidos en 1974. En 1978, la tilapia nilótica se introdujo en China, que actualmente es el principal productor mundial de esta especie (FAO, 2024).

Desde su introducción en diferentes países, la tilapia nilótica ha experimentado una distribución global y se cultiva principalmente en una amplia gama de países, incluidos Israel, Brasil, Indonesia, Tailandia, China, Taiwán, Estados Unidos, Asia Suroriental, India, Panamá, Costa Rica, Honduras, Jamaica y México (Iturbide, 2004).

### **2.3.3. Nutrición**

En cuanto a hábitos alimenticios el género *Oreochromis* es omnívoro consumiendo fitoplancton y zooplancton, pueden filtrar su alimento por medio de las branquiespinas, su ciclo desde el nacimiento hasta la cosecha es de 6 - 9 meses, esta produce una carne blanca de excelente calidad, también es tolerante a los cambios en la calidad del agua como pH, temperatura, oxígeno y diferentes salinidades (Saavedra, 2006).

También puede filtrar alimentos como partículas suspendidas, que atrapa en las mucosas de la cavidad bucal (FAO, 2011).

### **2.3.4. Producción**

La producción comercial de tilapia ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años, convirtiéndose en el cuarto grupo de peces más importante a nivel mundial, después de las carpas. En el año 2016, la producción mundial por

acuicultura superó los 5 millones de toneladas métricas (SOFI, 2018). Siendo la tilapia es el tercer tipo especie de pez más producido en la acuicultura de todo el mundo, por lo anterior, esta especie se puede adaptar prácticamente a todo tipo de acuicultura, desde la acuicultura familiar, rural, hasta industrial; siendo una fuente muy importante de proteínas de calidad para el consumo humano accesible y a un bajo costo (EI-SAYED, 2019).

Entre los países con mayor producción en orden decreciente están: China, Indonesia Egipto y Filipinas; entre los mayores productores de América se encuentran Brasil y México (Figura 2a). La producción mundial de tilapia ha registrado un aumento sostenido, prácticamente en forma exponencial desde 1993 con 485 TM hasta 2021 con 7021 TM (Figura 2b), siendo que casi la totalidad de la producción es proveniente de la acuicultura (FAO, 2020).

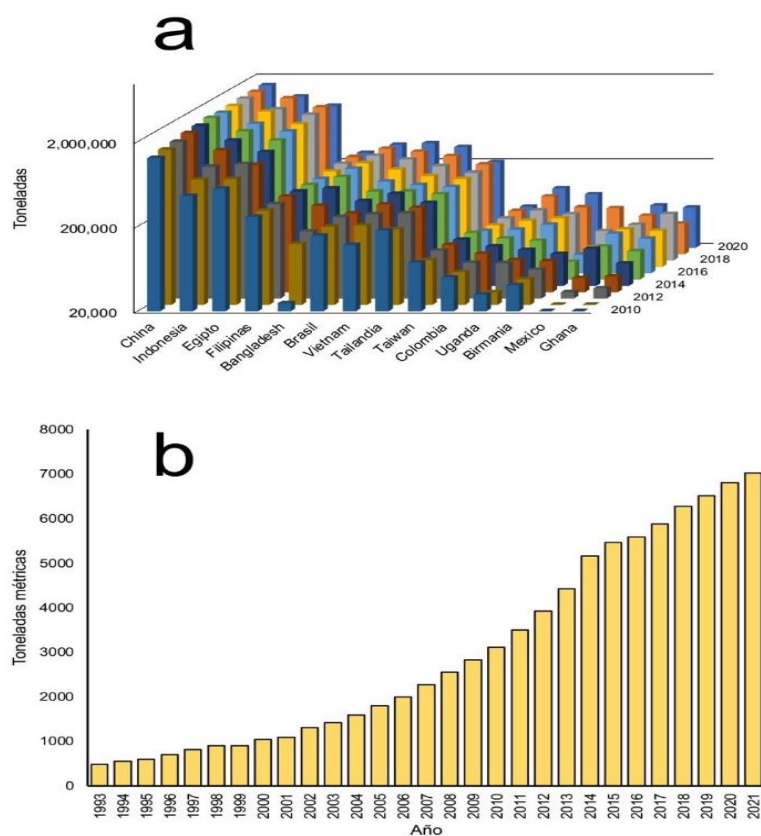


Figura 2. a) Producción de tilapia del año 2010 a 2020 de los principales productores a nivel mundial, b) Producción mundial de tilapia del año 1993 a 2021.

Fuente: FAO, 2020.

## **2.4. Parámetros de calidad de agua para la tilapia en sistemas acuapónicos**

### **2.4.1. Temperatura**

Las tilapias son peces de agua dulce, cálida tropical, el rango óptimo de temperatura es entre 25°C - 30°C. Estos peces son capaces de vivir en medios dulces y salobres, pero es necesario recalcar que no siempre soportan cambios bruscos de salinidad (Popman y Lovshin, 2000).

Los límites superiores de tolerancia oscilan entre 37°C - 42°C. Así mismo recomienda que el rango óptimo para el funcionamiento de un sistema acuapónico donde consideramos peces, plantas y bacterias es de 18°C - 30°C (World Renew y Diaconia Nacional, 2020).

### **2.4.2. Oxígeno disuelto**

El oxígeno se introduce en el agua de manera natural desde la atmósfera para los peces, pero en entornos de cultivo intensivo, se requiere el uso de bombas de agua para oxigenar el agua y de aireadores que inyectan aire directamente en el sistema (FAO, 2014). Este parámetro es de suma importancia para el cultivo, ya que se deben satisfacer las necesidades de bacterias, peces y plantas, además de garantizar el adecuado funcionamiento del sistema acuapónico, manteniendo el oxígeno por encima de los 3 mg/L, aunque lo ideal es mantenerlo por encima de los 5 mg/L (World Renew y Diaconia Nacional, 2020).

La concentración óptima de oxígeno ( $O_2$ ) para el óptimo desarrollo de la tilapia debe superar los 5.00 mg/L. Sin embargo, la tilapia tiene la capacidad de reducir su consumo de oxígeno cuando la concentración disminuye, e incluso puede recurrir al metabolismo anaeróbico en concentraciones mínimas, lo que ralentiza su crecimiento y solo permite alcanzar su tamaño comercial en un año (Guzmán, 2001).

Este parámetro muestra una relación inversa con la temperatura, ya que durante épocas calurosas disminuye el oxígeno disponible para los peces (Bautista y Ruiz, 2011).

### **2.4.3. pH**

La tilapia muestra un óptimo crecimiento en aguas con un pH neutro o ligeramente alcalino, que varía entre 7.00 y 8.00, ya que esto facilita la secreción normal de mucus en la piel. Los límites de tolerancia de la especie son un pH mínimo de 5.00 y un pH máximo de 11.00; el crecimiento se ve afectado negativamente en aguas ácidas, mientras que en aguas básicas el amonio se convierte en amoníaco tóxico, lo que puede llevar a la muerte de los peces (Guzmán, 2001).

Para la producción óptima de tilapia, se recomienda mantener niveles de pH entre 7 y 9. Es crucial controlar los cambios en el pH del agua, ya que desviaciones significativas de estos rangos pueden resultar en síntomas como letargia, falta de apetito y problemas en las tasas de crecimiento y supervivencia de los peces (Tsang y Quintanilla, 2008).

Así mismo para el normal funcionamiento de un sistema acuapónico donde debe existir un equilibrio para los peces plantas y bacterias se recomienda valores de 6 a 7 (FAO, 2014).

### **2.4.4. Conductividad eléctrica**

Rakocy *et al.*, (2006), menciona que, en un sistema acuapónico es recomendable tener niveles bajos de TDS (total de sólidos disueltos) que estén entre 0.3 - 600  $\frac{\mu S}{cm}$ , menciona que los principales compuestos que incrementan la conductividad eléctrica son el nitrato, fosfato, sulfato, potasio, calcio y magnesio. Generalmente los niveles de potasio y calcio son bajos en los sistemas acuapónicos así que el potasio generalmente se introduce al sistema como hidróxido de potasio (KOH) y el cómo hidróxido de calcio (Ca (OH)<sup>2</sup>).

#### **2.4.5. Sólidos disueltos totales**

Los niveles de sólidos disueltos totales en un sistema acuapónico deben de estar entre 200 mg/L a 400 mg/L, con estos niveles existe una continua generación de nutrientes ya que una preocupación en los sistemas acuapónicos son la acumulación de nutrientes debido a los sólidos que ingresan por las altas tasas de alimentación (Rakocy *et al.*, 2006).

#### **2.4.6. Amoníaco**

El amoníaco en su forma  $\text{NH}_3$  es relativamente tóxico, mientras que  $\text{NH}_4$  se considera que tiene poca o ninguna toxicidad. La toxicidad del amoníaco se debe a que puede difundirse fácilmente a través de la membrana debido a su solubilidad en lípidos y falta de carga. Así mismo se muestra que los alevines pueden soportar hasta 48 horas sin mortalidad alguna a una concentración de 2.23 mg/L de  $\text{NH}_3$ . También se reporta que existe una toxicidad aguda en alevines de tilapia en rangos de 7.39 mg/L a 7.41 mg/L en 48 horas (Karasu y Gülten 2005).

Cantor (2007) indica que, la toxicidad del amonio en su forma  $\text{NH}_3$  se incrementa cuando existe una baja concentración de oxígeno disuelto, elevado pH y una temperatura alta. Estos valores deben fluctuar entre 0.01 mg/L a 0.1 mg/L preferentemente, aunque los niveles de tolerancia de la tilapia van desde los 0.06 mg/L hasta los 2 mg/L.

#### **2.4.7. Nitrito**

Este se forma a partir de la oxidación del amoníaco, y son muy importante controlarlos por su alta toxicidad y es muy contaminante en el medio, una elevada concentración de nitritos puede interferir con la habilidad de la sangre para absorber oxígeno debido a la oxidación del ion ferroso de la hemoglobina produciendo ion férrico ocasionando anemia crónica. los rangos que se recomiendan van desde los 0 mg/L a los 0.1 mg/L para la especie tilapia (Cantor, 2007).

World Renew y Diaconia Nacional (2020), menciona que, un sistema acuapónico que está en funcionamiento adecuado debe tener valores de menores a los 0.1 mg/L.

#### **2.4.8. Nitrato**

Los nitratos en el agua para los peces no son muy peligrosos, rangos de 0ppm a 40 ppm en general son muy seguros para las tilapias, pero rangos superiores a los 80 ppm pueden causar toxicidad en estos (Bautista y Ruiz, 2011).

Para la producción acuapónica la concentración de nitratos es de vital importancia para las plantas ya que es su principal fuente de nitrógeno, se recomienda rangos de 5 mg/L a 150 mg/L, para que exista un buen funcionamiento del sistema (FAO, 2014).

### **2.5. Maíz en sistemas acuapónicos**

#### **2.5.1. Antecedentes**

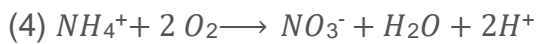
El FVH, (forraje verde hidropónico) un forraje verde succulento, alcanza una altura de aproximadamente 20 cm a 30 cm, dependiendo del período de crecimiento, y es completamente apto para el consumo animal (Hacker y Minson, 1972; Foley *et al.*, 1973; Murphy, 1991; FAO, 2002; Rodríguez, 2003). Su alto valor nutricional se debe a la germinación de los granos (Araño, 1998; Rodríguez, 2003) y al momento en que se ofrece a los animales (Hacker y Minson, 1972; McDonald *et al.*, 1988).

El maíz, con una historia que se remonta aproximadamente 7000 años, fue cultivado principalmente en distintas zonas de México y América Central. Peña (2011), menciona que este cultivo tiene la notable capacidad de adaptarse a una amplia variedad de condiciones climáticas, incluyendo precipitación, altitud sobre el nivel del mar, temperatura, humedad relativa y tipo de suelo.

Los aztecas desarrollaron una forma temprana de acuaponía al criar peces junto a sus cosechas. Utilizaban islas artificiales llamadas "chinampas", construidas en pantanos y lagos someros, donde cultivaban maíz y otras plantas. Los canales navegables que rodeaban estas islas se utilizaban para la cría de peces. Los desechos de los peces que se acumulaban en el fondo de los canales eran recolectados y utilizados como fertilizante para las plantas (Matus *et al.*, 2009).

## 2.5.2. Ciclo del nitrógeno y proceso de nitrificación

El proceso de nitrificación es realizado por bacterias quimiolitioautótrofas que emplean carbono inorgánico como fuente de carbono para la síntesis celular y el nitrógeno amoniacal para obtener energía (Claros, 2012). La nitrificación consta de dos etapas, en la primera el nitrógeno en forma de amonio es oxidado a nitrito (bacterias de género *Nitrosomas*), seguida de una segunda etapa en la que éstos son oxidados a nitratos (bacterias de género *Nitrobacter*), (Ecuación 4) (Escaler y Mujeriego, 2001).



## 2.6. Variables de interés zootécnico

### 2.6.1. Comportamiento

El comportamiento es generalmente la primera línea de defensa del animal en la interacción con su entorno, el cual proporciona una gran cantidad de información sobre requisitos, preferencias y estados internos del animal. Los peces, como muchos otros animales, muestran un alto grado de plasticidad conductual, así como diferencias individuales de comportamiento. Estas diferencias individuales en las respuestas a los estresores se reconocen cada vez más como una variación adaptativa y, por lo tanto, como un factor relevante para la evolución y las mejoras en la acuicultura, incluida la cría selectiva. El estudio de esas diferencias individuales y consistentes de comportamiento en especies de peces de acuicultura inició en el pez espinoso (*Gasterosteus aculeatus*) (Huntingford, 1976).

Como varios autores han señalado los estudios de laboratorio en condiciones controladas constituyen excelentes oportunidades para conocer mejor el comportamiento de los peces (Kemp *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2009).

La medición del comportamiento puede realizarse de manera cuantitativa y cualitativa, utilizando diferentes parámetros como el modo de natación, exhibiciones de aletas, frecuencias de ventilación branquiales, patrones de pigmentación, coloración de la piel y la respuesta a la alimentación (Martins *et al.*, 2012).

Cada vez más investigadores se dedican a descubrir pautas heredadas de comportamiento, las cuales han demostrado ser claves válidas y fiables para interpretar el origen y parentesco de grandes grupos de animales. Es ampliamente aceptado que los animales heredan ciertos rasgos de conducta primarios, los cuales son más evidentes en especies como peces y aves. Para ellos, los genes no predeterminan, sino que predisponen el desarrollo de capacidades comportamentales que se activaran en el curso del desarrollo epigenético, o sea, como resultado de las experiencias del individuo (Calderón, 2002). Estos patrones de conducta, enraizados en la carga fisiológica hereditaria común a las especies que los exhiben, forman una unidad natural de herencia y suelen resistirse al aprendizaje individual, transformándose lentamente a lo largo de la evolución de las especies. La Etología moderna, entendida como el estudio biológico del origen y evolución de la conducta o comportamiento animal en su ambiente natural (Rodero, 1999), connota aspectos fisiológicos, eco- lógicos y comparativos. consideran que las aptitudes de comportamiento de los animales y el hombre son el resultado de sus potencialidades genéticas.

En el caso de los animales, incluidos los peces, y los humanos sometidos a estrés ambiental, se observan cambios tanto en su comportamiento como en su fisiología (Flik *et al.*, 2006). Los peces fueron los primeros vertebrados en desarrollar una respuesta al estrés, que involucra interrelaciones entre los ejes relacionados con el sistema nervioso y el sistema endocrino (Engelsma *et al.*, 2002; Flik *et al.*, 2006).

El estrés en la acuicultura puede surgir debido a variables físicas, químicas y biológicas en la calidad del agua, así como a prácticas gerenciales rutinarias en el cultivo, como la densidad de siembra, manipulación, clasificación y transporte (Barton, 2002). Asimismo, el estrés puede incrementar la susceptibilidad a enfermedades (Pickering y Pottinger, 1987) afectando el crecimiento y la reproducción de los peces (Pankhurst y Van der Kraak, 1997).

El estrés desencadena respuestas neuroendocrinas que pueden afectar la habilidad de los organismos a restablecer su homeostasis (Shreck, 2010), impactando negativamente su salud, crecimiento, supervivencia, funciones reproductivas, y por

lo tanto pudiendo reducir la productividad de las unidades de producción acuícolas y conllevando a concientizar al sector productivo y científico sobre el bienestar de los peces bajo cultivo.

Así que, el estrés se puede definir como una situación en la cual el equilibrio homeostático es modificado como consecuencia de la acción de un estímulo (intrínseco o extrínseco) al animal, denominado agente estresante. El animal responde mediante una serie de reacciones de comportamiento o fisiológicas con objeto de compensar y adaptarse a la nueva situación (Wendelaar, 1997; Øverli, *et al.*, 2001; Øverli, *et al.*, 2004).

### **2.6.2. Peso**

El peso es uno de los indicadores más importantes para evaluar el rendimiento de los peces en sistemas de cultivo. (Meyer, 2015), menciona que el peso está influenciado por factores como la densidad de peces, la calidad del agua y el tipo de dieta que se les proporciona.

### **2.6.3. Longitud**

Meyer (1999), menciona que el crecimiento de los peces depende en gran parte de la calidad del agua; por lo que, para lograr una buena producción, es necesario mantener las condiciones fisicoquímicas del agua dentro de los límites de tolerancia para la especie a cultivar.

## **2.7. Fenotipo de comportamiento**

En los peces diferencias en comportamiento están asociadas a respuestas de estrés fisiológicos y son utilizadas para separar la población en diferentes fenotipos citados en la literatura como estilos de afrontamiento, personalidad animal y temperamento (Réale y Dingemans 2010; Silva *et al.*, 2010). Los extremos de esta variación individual han mostrado ser consistentes de forma contextual y temporal y son conocidos como proactivos y reactivos (Koolhaas *et al.*, 1999). El fenotipo proactivo muestra control territorial y rutinas rígidas, mientras que el fenotipo reactivo muestra un comportamiento pasivo y per-sección de los cambios ambientales (Ruiz *et al.*, 2011).

## **2.8. Bienestar animal**

El bienestar considera al animal en un estado de armonía en su ambiente y la forma por la cual reacciona frente a los problemas del medio, tomando en cuenta su confort, alojamiento, trato, cuidado responsable, nutrición, prevención de enfermedades, manejo y eutanasia humanitaria cuando corresponda (Estol, 2008). Donde el estrés influye sobre los cambios fisiológicos e inmunológicos de los organismos, y crean catecolaminas en plasma, corticosteroides y se eleva la concentración de glucosa, además de cambios etológicos mostrando agresividad y nado errático; si estos cuadros de estrés son muy prolongados o frecuentes, amenazan la supervivencia de los organismos en cultivo (Jianyu *et al.*, 2006; Qiang *et al.*, 2016).

Teniendo en cuenta el concepto general de bienestar, el bienestar en peces no deja de tener el mismo grado de complejidad; complejidad que incrementa debido a la escasa información de carácter científico sobre este tema en específico, ya sea en sistemas productivos, confinados o naturales (FAWC, 1996). Asegurando así que en perspectiva existen características neuroanatómicas y fisiológicas, debido a esto los peces son incapaces de sentir o tener sensibilidad.

## III. MATERIALES Y METODOS

### 3.1 Objetivos

#### 3.1.2. Objetivo general

- Evaluar el efecto de la tecnología acuapónica en el desempeño de fenotipos de comportamiento de tilapia de Nilo.

#### 3.1.3. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la tecnología acuapónica en variables fisicoquímicas del agua.
- Determinar bienestar animal de los fenotipos de comportamiento en la tecnología acuapónica.
- Determinar el desempeño productivo de los fenotipos de comportamiento en la tecnología acuapónica.

### 3.2. Hipótesis

#### 3.2.1. Hipótesis (o):

No existen diferencias significativas en las variables zootécnicas, de bienestar animal y fenotipos de comportamiento de *O. niloticus* entre los individuos criados en un sistema acuapónico y aquellos criados en un sistema tradicional.

#### 3.2.3. Hipótesis (a):

Existen diferencias significativas en las variables zootécnicas, de bienestar animal y fenotipos de comportamiento de *O. niloticus* entre los individuos criados en un sistema acuapónico y aquellos criados en un sistema tradicional.

### 3.3. Ubicación geográfica

La presente investigación se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, provincia de Chiriquí, ubicada en el corregimiento de Chiriquí, en las instalaciones del programa avícola (Figura 3). Este módulo se encuentra situado en las coordenadas 8.3883953, latitud N y -82.330146 longitud O, a 10 m sobre el nivel del mar (Google, 2024). De acuerdo con el mapa de zonas de vida de Holdridge, pertenece a la zona climática tropical. La temperatura promedio anual es de 25°C con una humedad que permanece entre el 5% del 95% y la precipitación pluvial anual de 140.22 mm (Holdridge Life Zones, 2024).



Figura 3. Ubicación geográfica de la investigación.

Fuente: Google, (2024).

### 3.4. Trabajo de campo

#### 3.4.1 Alojamiento

Se utilizaron tinajas circulares de 0.5 m<sup>3</sup> (43 m x 1.0 m x 0.55 m, largo x ancho x altura), equipadas con un sistema auxiliar de oxigenación suministrado por una bomba de oxígeno (Vivosun Oxygen Pump®).

### **3.4.2. Especie, población, aclimatación y alimentación**

Se adquirieron aproximadamente 300 individuos juveniles de tilapia del Nilo, de sexo indefinido, los mismos fueron obtenidos en la estación experimental de la Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP), Ricardo A. Ríos, ubicada en Gualaca, provincia de Chiriquí. El periodo de aclimatación de los individuos experimentales fue de aproximadamente tres meses hasta que los animales no mostraron signos evidentes de estrés, donde fueron divididos y alojados en tanques de 500 L, cada uno debidamente equipados con un sistema de filtros, bombas y equipo auxiliar de oxigenación. Se alimentaron hasta la saciedad dos veces al día durante el periodo de aclimatación con una tasa de alimentación del 5% de la biomasa. Durante el periodo experimental se le suministró alimento comercial con 25% de proteína cruda (Tilapia 25%, Grupo CALESA ®) con una tasa de 5% de su peso vivo, esta cantidad de alimento fue dividida en tres porciones iguales administradas en un horario de 08:00 a.m., 12:00 p.m. y 04:00 p.m.

### **3.5. Selección de los fenotipos**

Previo a la selección se descartaron todos aquellos peces que presentaron lesiones permanentes a causa de enfermedades que atacaron durante el periodo de aclimatación o por lesiones mecánicas.

Para la selección de fenotipos de comportamiento se utilizó la prueba de restricción (Castanheira *et al.*, 2013), consistió en alojar cada pez individualmente en una malla fuera del agua por un minuto, para la selección de los fenotipos se utilizó el número de intentos de escape, seleccionando individuos con menos de cinco saltos como reactivos (RA), individuos entre cinco y once saltos intermedios e individuos con más de once saltos fueron considerados proactivos (PA). Los individuos intermedios fueron descartados en esta investigación.

Los peces de cada uno de los fenotipos de comportamiento fueron identificados con el uso de elastómeros (SALES RECEIPT®) de diferente color, ubicados en el

hemisferio derecho en la zona postorbital. El color azul para individuos reactivos y color verde para individuos proactivos.

Se seleccionaron 96 animales juveniles de tilapia del Nilo (peso promedio 90 g y una longitud total de 11 cm, divididos en dos grupos de comportamiento: 48 reactivo y 48 proactivo. Los fenotipos de comportamiento no mostraron diferencias significativas en el peso y longitud total iniciales ( $p>0.05$ )

### 3.6. Sistemas

El sistema acuapónico (CSA) estaba equipado con un sedimentador, un filtro mecánico y un filtro biológico de tapaderas plásticas de diferentes diámetros y dentro de este se encontraba una bomba de agua (figura 4 y 5). El sistema tradicional (SSA) consistió en una tina equipada con una bomba de oxígeno y de recirculación de agua.

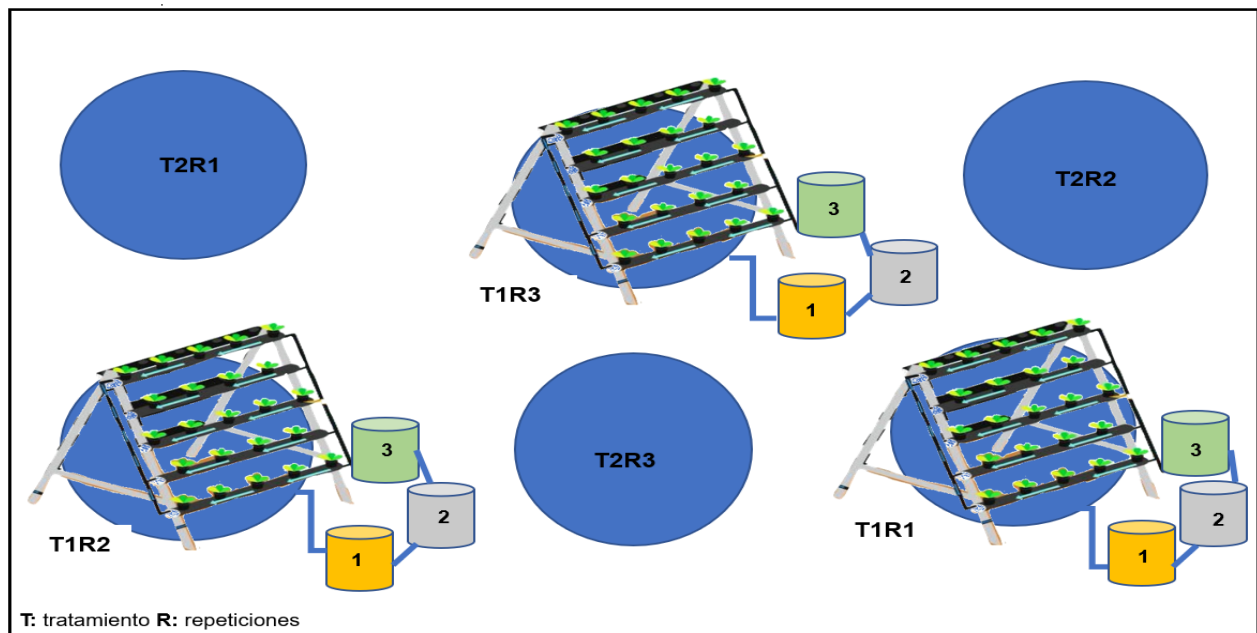


Figura 4. Croquis de la distribución de tratamientos y repeticiones de la investigación.



Figura 5. Imagen de la distribución de los tratamientos y repeticiones.

Los animales experimentales se distribuyeron por triplicado en seis tinajas. De estas, tres tinajas estaban adaptadas a un sistema acuapónico y las otras tres a un sistema tradicional. En cada tinaja se colocaron 16 individuos, compuestos por 8 peces reactivos y 8 proactivos.

### 3.7. Maíz

El trasplante y la cosecha del forraje hidropónico utilizando maíz (*Zea mays*) se realizaron de manera progresiva. Las plántulas se trasplantaron en intervalos de 18 días, y al completar el ciclo de desarrollo, las plantas se removían de manera secuencial, comenzando con las más antiguas en la primera hilera, para su posterior pesado de raíces, tallo, biomasa total y contabilizar el número de hojas. Una vez que una hilera era cosechada, el espacio se reutilizaba para trasplantar nuevas plántulas, asegurando así un flujo continuo de producción a lo largo del tiempo. Se realizó de esta manera para evitar alteraciones en los parámetros fisicoquímicos del agua, garantizando así un ambiente óptimo para el crecimiento de las plántulas y el mantenimiento de la calidad del sistema acuapónico.

### **3.8. Parámetros fisicoquímicos del agua**

Los parámetros fisicoquímicos se evaluaron diariamente en un horario matutino de 8:00 a.m. y 9:00 a.m., utilizando un equipo multiparamétrico portátil HQ40D (HACH®).

Por otra parte, se utilizó el Kit colorimétrico para agua (API®), que determinó el amoníaco, nitrito y nitrato.

Se realizaron dos recambios del agua por semana de ser necesario, así se mantuvo la calidad del agua en sus niveles óptimos para el crecimiento tanto de los peces, como de las plantas, eliminando los desechos acumulados, los nutrientes no utilizados y el alimento no consumido, que podrían acumularse y afectar la salud de los peces y desarrollo de las plantas.

#### **3.8.1. Temperatura**

Se utilizó una sonda multiparamétrica HQ40D (HACH®) que incorpora una sonda de temperatura sumergible. Cada mañana a las 8:00 a.m. el dispositivo fue colocado directamente en el agua para garantizar una lectura precisa. La sonda midió la temperatura en tiempo real, registrando los datos en intervalos regulares. Este enfoque permitió obtener lecturas consistentes y confiables de la temperatura ambiental fundamental para el control y monitoreo adecuado del ambiente acuático.

#### **3.8.2. Oxígeno disuelto**

La medición del oxígeno disuelto en el agua se llevó a cabo utilizando el mismo medidor multiparamétrico, que incorpora un sensor especializado para este parámetro. La medición se realizaba a las 8:00 a.m. la sonda era sumergida en la tina para capturar el nivel de oxígeno disuelto. El medidor ofreció lecturas instantáneas que se registraron y analizaron para asegurar la disponibilidad adecuada de oxígeno para las tilapias, garantizando condiciones óptimas para su salud y crecimiento.

### **3.8.3. pH**

El pH del agua se determinó con el medidor multiparamétrico, que incluye un electrodo de pH. Cada mañana a las 8:00 a.m. la sonda fue sumergida en el centro de cada tina para medir el nivel de acidez o alcalinidad. El dispositivo registró el Ph en tiempo real y proporcionó lecturas precisas que se documentaron para monitorear las condiciones del agua según fuera necesario. El control del pH fue esencial para mantener un ambiente adecuado para las tilapias y asegurar su bienestar.

### **3.8.4. Conductividad eléctrica**

Se realizó utilizando un conductímetro (HEALTH METRIC®). El conductímetro fue sumergido en cada una de las tinas para evaluar la capacidad del agua para conducir electricidad, lo cual es un indicador de la concentración de sales y otros iones disueltos. El dispositivo proporcionó lecturas en tiempo real que fueron registradas posteriormente.

### **3.8.5. Sólidos disueltos totales (TDS)**

Se utilizó un medidor de TDS (HEALTH METRIC). Este dispositivo fue sumergido en cada tina a las 8:00 a.m. aproximadamente para medir la concentración de sólidos disueltos en el agua. El medidor proporcionó lecturas inmediatas, permitiendo un análisis preciso de la cantidad de partículas disueltas y contribuyendo al control de la calidad del agua para el bienestar de las tilapias.

### **3.8.6. Amoníaco**

El kit colorimétrico de prueba de amoníaco (API®), en base a salicilatos leía el nivel total de amoníaco en partes por millón (ppm) que son equivalentes a miligramos por litro de 0 ppm a 8.0 ppm (mg/L). Esta prueba fue realizada de la siguiente forma:

- Se utilizaron tubos de ensayo limpios, agregándoles 5 ml de agua de cada tina.
- Posteriormente se sostenía el tubo de ensayo en forma vertical añadiendo 8 gotas del frasco n°1 de Amonia ( $\text{NH}_3 / \text{NH}_4^+$ ) Test Solution. De igual forma, manteniendo verticalmente el tubo de ensaño se añadía otras 8 gotas del frasco n°2 de Amonia ( $\text{NH}_3 / \text{NH}_4^+$ ).
- Luego, se colocaban los tapones sobre los tubos de ensayo y se agitaba vigorosamente por 5 segundos para que luego de 5 minutos de espera permitir que el color se manifestara. Por último, se leía el resultado del análisis comparando el color de la solución con la carta Ammonia Color Chart, seleccionando el color más parecido de la carta de colores para registrarlo.

### **3.8.7. Nitrito**

El kit colorimétrico de prueba (API®) para nitritos evaluaba colorimétricamente el nivel total de nitritos en partes por millón (ppm) que son equivalentes a miligramos por litro mg/L de 0 ppm a 5.0 ppm mg/L. Esta prueba se efectuó de la siguiente manera:

- Con un tubo de ensayo limpio se llenó 5 ml de agua de cada entrada y salida del sistema acuapónico.
- Después, manteniendo el frasco en forma vertical se añadieron 5 gotas de Nitrito ( $\text{NO}_2$ ).
- Luego, se esperó 5 minutos con el fin de que el color se desarrollara.
- Finalmente, en un lugar bien iluminado se compara el resultado obtenido de la solución con la carta Nitrate Color Chart, el color más parecido indica la concentración en nitrito en mg/L y se procedía a registrar el dato obtenido en el cuaderno.

### **3.8.8. Nitrato**

El kit colorimétrico de prueba (API®) para nitratos evaluaba colorimétricamente el nivel total de estos en partes por millón (ppm) que son equivalentes a miligramos por litro (mg/L) de 0 ppm a 160 ppm (mg/L). Esta prueba se realizó de la siguiente manera:

- En 5 ml de agua de cada entrada y salida del sistema acuapónico se llenó un tubo de ensayo.
- Luego, se añadieron 10 gotas del frasco n°1 de Nitrato (NO<sub>3</sub>) Test Solution se debió colocar el frasco cuentagotas hacia abajo en posición vertical con el fin de que las gotas sean uniformes.
- Después, se colocó el tapón sobre el tubo de ensayo y se agito varias veces con el fin de mezclar la solución.
- Luego, vigorosamente se agito el frasco n°2 Nitrato (NO<sub>3</sub>) Test Solution por 30 segundos ya que era una etapa muy importante.
- Además, se añadieron 10 gotas del frasco n°2 manteniendo el frasco cuentagotas hacia abajo en posición vertical con el fin de que las gotas cayeran uniformes, se colocó el tapón sobre el tubo de ensayo y se agito fuertemente durante 1 minuto. Se tenía que esperar 5 minutos con el fin de que el color se desarrolle. Para terminar, se leía el resultado de la solución utilizando la carta Nitrato Color Chart. El tubo debía colocarse en una zona iluminada sobre el fondo blanco de la carta, el color más parecido indicaba la concentración en mg/L.

## **3.9. Indicadores de comportamiento**

### **3.9.1. Prueba de actividad**

Se evaluaron tres variables latencia para entrar en la primera zona, número de transiciones y tempo de congelamiento, siguiendo la metodología propuesta por y Overli *et al.*, (2006); y Millot, (2009). Las evaluaciones se realizaron a través de un sistema de video (SONNY®). El aparato de prueba consistió en una tina rectangular de vidrio cubierta con una tela oscura en los cuatro lados para reducir el estrés,

dejando un pequeño espacio para filmar. El fondo de la pecera de comportamiento se separó en 4 áreas para seguir el movimiento horizontal del individuo.

### **3.9.2. Latencia para entrar a la primera zona (LPZ)**

El pez fue colocado suavemente en una de las cuatro zonas, y se evaluó el tiempo en segundos para entrar a cualquiera de las tres zonas restantes. Se consideró que el pez había ingresado a una nueva zona cuando su boca atravesaba la línea que divide las zonas.

### **3.9.3. Número de transiciones (NT)**

Consistió en el número de veces que el pez ingresó en cada una de las zonas. Se consideró que el pez ingresó a una nueva zona cuando la boca del pez atravesaba la línea que separaba las zonas.

### **3.9.4. Congelamiento**

Se evaluó como el tiempo en segundos que el pez se mantiene inmóvil excepto los movimientos operculares o bucales.

## **3.10. Variables de estrés**

### **3.10.1. Frecuencia ventilatoria**

Se evaluó la frecuencia ventilatoria (VR), en movimientos operculares por minuto (bpm - “beats per minute” por sus siglas en inglés) tomando seis peces al azar (tres reactivos y tres proactivos) de cada tratamiento, contando el tiempo necesario para 20 movimientos operculares o bucales durante tres minutos, de acuerdo con la metodología propuesta por (Silva *et al.* 2010; Calderer, 2001). Las observaciones se realizaron desde uno de los laterales cubierto, a través de una abertura en el lado frente al observador (Calderer, 2001).

### **3.10.2. Glucosa**

Se examinó la concentración de glucosa en sangre, con un kit medidor de glucosa (Easy Touch® GCHb). La toma de glucosa en las tilapias se llevó a cabo con los peces en estado de ayuno para garantizar la precisión de los resultados. El

procedimiento se realizó a las 8:00 a.m., después de haber administrado la última comida a las 4:00 p.m. del día anterior. Primero, se capturaron los peces con una red y se procedió a colocarlos en una tina durante 10 minutos para reducir el estrés y permitir que se calmaran. Posteriormente, se capturaban cuidadosamente para realizar la extracción. La muestra de sangre se extraía mediante punción de la vena caudal utilizando una jeringa estéril. Esta metodología permitía obtener muestras consistentes y precisas para la medición de glucosa, asegurando condiciones controladas y minimizando el impacto en los peces.

### **3.11. Variable de bienestar animal**

#### **3.11.1. Daño de aleta**

Uno de los indicadores más utilizados en la industria acuícola es el daño en la aleta dorsal (Noble *et al.*, 2008). Para evaluar el grado de erosión se empleó la escala adaptada de Person-Le Ruyet y Le Bayon (2009), en donde: nivel 0: aleta perfecta, con las extremidades intactas, nivel 1: sin cambios serios en el área total de la aleta (<10%) nivel 2: disminución moderada en el área total de la aleta (<20%) nivel 3: disminución marcada en el área total de la aleta (<50%) y nivel 4: aletas cortas y disfuncionales, pérdida marcada del área total de la aleta (>50%).

### **3.12. Variables zootécnicas**

#### **3.12.1. Peso**

Se evaluó el peso final en gramos individual de los peces de cada uno de los tratamientos con una balanza eléctrica (OHAUS®) con capacidad de 1.5 Kg con aproximación de 0.01g.

#### **3.12.2. Longitud**

Se evaluó la longitud total en cm, medido desde el extremo anterior de la mandíbula hasta el extremo distal del radio más largo de la aleta caudal, empleando un ictiómetro (PENTAIR®) de 23 cm, de acuerdo con el criterio de (Laevastu, 2011).

### **3.13. Análisis estadístico**

Los datos fueron tabulados en una hoja de cálculo (Microsoft 365®). Para el análisis se utilizaron los softwares R (R versión 4.2.2, 2022-10-31, RStudio, Inc.) y Statistica V12.5 (StatSoft, Inc®). Las figuras se realizaron con el programa Prisma (GraphPad®). Las variables de respuesta fueron examinadas para normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas por la prueba de Levene.

Las variables fisicoquímicas del agua, latencia para entrar en la primera zona, tiempo de congelamiento, latencia para el primer intento de escape, peso y longitud total fueron evaluadas con la prueba de Mann-Whitney para diferencias entre sistemas y fenotipos de comportamiento, su interacción fue evaluada con la prueba de Kruskal-Wallis y aquellas que mostraron diferencias fueron corregidas con la prueba de Dunn's. Glucosa en sangre fue evaluada mediante un análisis de varianza factorial (ANOVA Factorial). Número de transiciones, número total de intentos de escape, frecuencia ventilatoria y erosión de aleta fueron evaluados con modelos lineales generalizados ajustados por la familia Poisson, aquellas que mostraron diferencias fueron corregidas con la función glht (multcomp R). Se utilizó un alfa de  $<0.05$ .

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Variables fisicoquímicas

#### 4.1.1. Temperatura

La prueba de U Man- Whitney revelan que no existe diferencia significativa en la temperatura ( $U = 574.50$   $p > 0.05$ ) entre los sistemas estudiados.

#### 4.1.2. Oxígeno disuelto

El análisis mediante la prueba U de Mann-Whitney demuestra que existe diferencias significativas ( $U = 446.00$ ;  $p = 0.52$ ) en el oxígeno disuelto entre los sistemas como se muestra en la (figura 6).

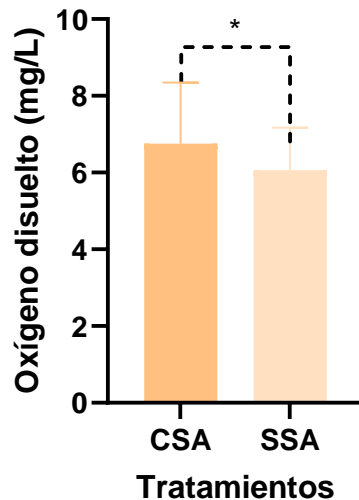


Figura 6. Media  $\pm$  D.E., de oxígeno disuelto en mg/L. \* $p < 0.05$ .

#### 4.1.3. pH

Los resultados de la prueba de U Mann Whitney evidencian que no existe diferencias significativas en el pH, entre los sistemas estudiados ( $U = 604.50$ ;  $p = 0.77$ ).

#### 4.1.4. Total de solidos disueltos

La prueba de U Mann Whitney revela que no existe diferencia significativa en el total de solidos disueltos, (U=615.50: p=0.87) durante el periodo experimental.

#### 4.1.5. Conductividad eléctrica

El resultado de la prueba U de Mann-Whitney refleja que no existe diferencias significativas en la conductividad eléctrica entre los sistemas (U=574.50: p=0.52).

#### 4.1.6. Amoniac

El análisis con la prueba U de Mann-Whitney indica que no existe diferencia significativa para el amoniac (U= 520; p=0.20).

#### 4.1.7. Nitrito

La evaluación a través de la prueba U de Mann-Whitney sugiere que existe diferencia significativa en el nitrito (U = 380.00; p<0.05) entre los sistemas como se muestra en la (figura 7).

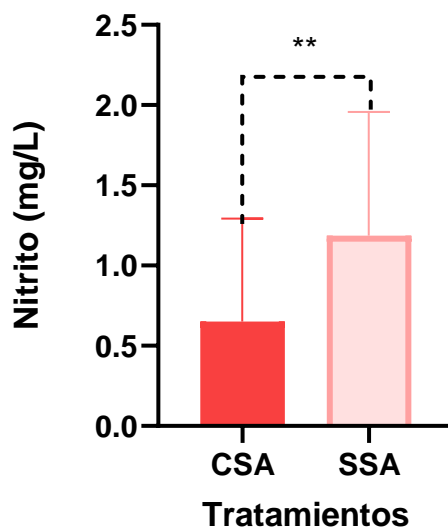


Figura 7. Media ± D.E., de nitrito en mg/L. \*\*p<0.01.

#### **4.1.8. Nitrato**

Los resultados obtenidos con la prueba U de Mann-Whitney señalan que el nitrato ( $U = 578.00$ ;  $p = 0.55$ ) no mostró diferencia significativa durante el periodo de estudio.

### **4.2. Indicadores de comportamiento**

#### **4.2.1. Prueba de actividad**

#### **4.2.2. Latencia primera zona (LPZ)**

Los resultados muestran que no existe diferencias significativas entre los sistemas ( $U = 159.50$ ;  $p = 0.94$ ), fenotipos de comportamiento ( $U = 123.50$ ;  $p = 0.22$ ) o su interacción ( $K-W = 2.69$ ;  $p = 0.44$ ) en la latencia para entrar en la primera zona.

#### **4.2.3. Tiempo de congelamiento**

Los resultados muestran que no existe diferencias significativas entre los sistemas ( $U = 135.50$ ;  $p = 0.41$ ), fenotipos de comportamiento ( $U = 141.50$ ;  $p = 0.52$ ) o su interacción ( $K-W = 2.97$ ;  $p = 0.39$ ) en la latencia para entrar en la primera zona.

#### **4.2.4. Número de transiciones**

En la tabla 1 se puede observar que no existe diferencias significativas entre sistema y fenotipo de comportamiento ( $p > 0.05$ ), sin embargo, existe diferencias significativas entre la interacción sistema y fenotipo de comportamiento ( $p < 0.05$ ) durante el periodo experimental.

Tabla 1. Número de transiciones ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción.

	EFFECTOS FIJOS	ESTIMADOR	ERROR ESTÁNDAR	Z- VALOR	P- VALOR	SIGNIFICANCIA
	Intercepto	3.28	0.06	50.86	<0.05	***
SISTEMA	CS	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SS	0.16	0.08	1.87	0.06	
FENOTIPO	P	Ref	Ref	Ref	Ref	
	R	-0.05	0.09	-0.55	0.57	
SISTEMA FENOTIPO	CSP	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SSR	-0.53	0.13	-3.91	<0.05	***

La prueba de comparaciones múltiples utilizando el método Tukey (figura 8), indica que existen diferencias significativas entre proactivos y reactivos en el sistema tradicional ( $p < 0.001$ ). También, se encontraron diferencias entre reactivos en los dos sistemas ( $p < 0.01$ ).

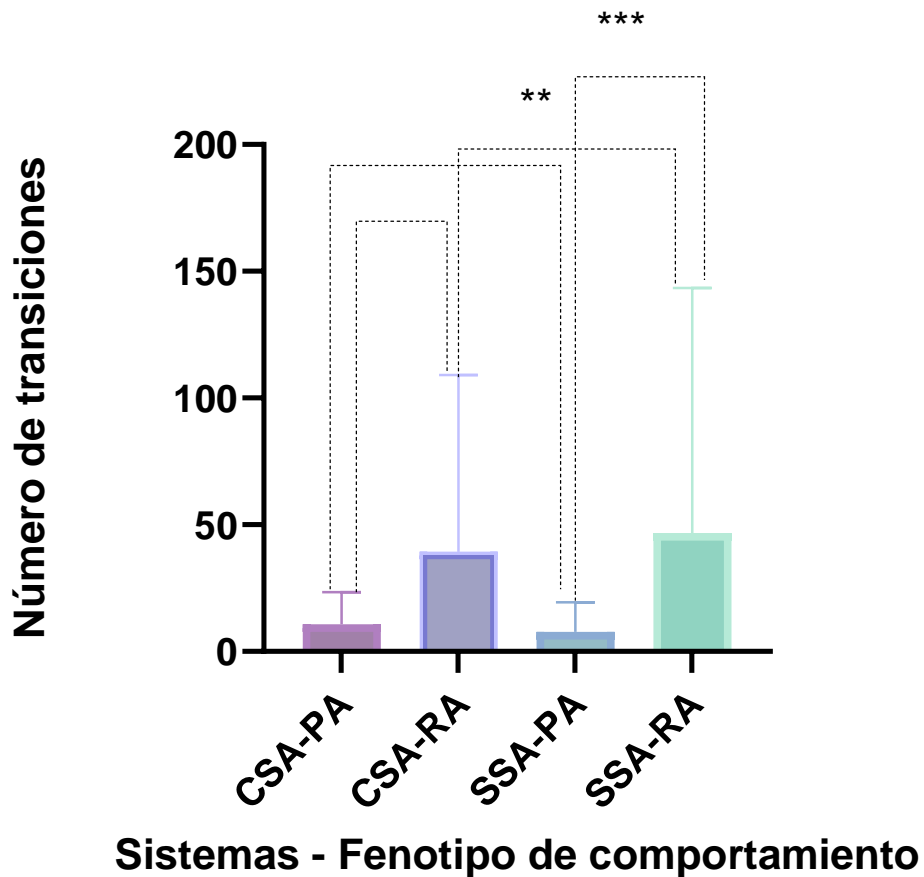


Figura 8. Media  $\pm$  D.E., de número de transiciones. \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$ .

### 4.3. Prueba de restricción

#### 4.3.1. Latencia para el primer movimiento (LPM)

La prueba de U Mann Whitney muestra que no existe diferencias significativas entre los sistemas en la prueba de restricción en latencia para el primer movimiento ( $U = 138.00$ ;  $p = 0.45$ ). Sin embargo, existe diferencias significativas entre fenotipo de comportamiento ( $U = 99.00$ ;  $p = 0.04$ ; figura 9). La prueba de Kruskal-Wallis indica que no existe diferencias significativas en la interacción sistema fenotipo de comportamiento ( $K-W = 5.52$ ;  $p = 0.13$ ).

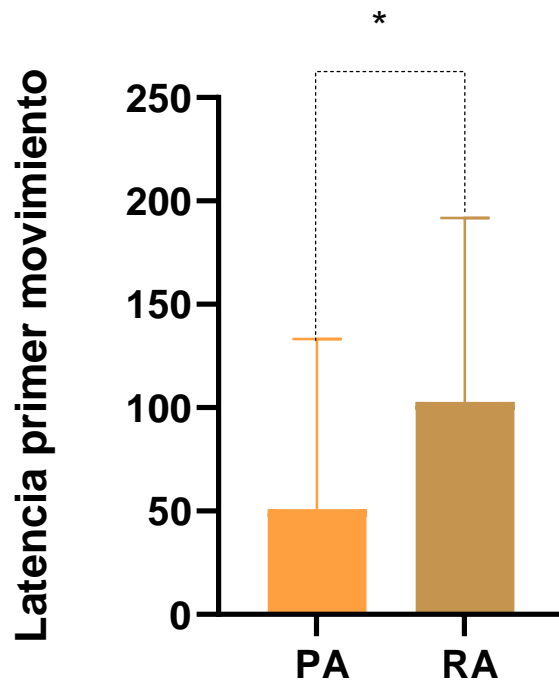


Figura 9. Media  $\pm$  D.E., de latencia primer movimiento. \* $p < 0.05$ .

#### 4.3.2. Número total de movimientos

En la tabla 2 se puede observar que no existe diferencias significativas entre los sistemas, fenotipos de comportamiento y su interacción en el número total de movimientos ( $p > 0.05$ ).

Tabla 2. Número total de movimientos ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción.

	EFFECTOS FIJOS	ESTIMADOR	ERROR ESTÁNDAR	Z-VALOR	P-VALOR	SIGNIFICANCIA
	Intercepto	1.32	0.17	7.75	<0.05	***
SISTEMA	CS	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SS	0.32	0.22	1.43	0.15	
FENOTIPO	P	Ref	Ref	Ref	Ref	
	R	-0.30	0.26	-1.16	0.24	
SISTEMA FENOTIPO	CSP	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SSR	-0.49	0.37	-1.33	0.18	

#### 4.4. Indicadores de estrés

##### 4.4.1. Frecuencia ventilatoria

En la tabla 3 se puede observar que no existe diferencias significativas entre los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción en la frecuencia ventilatoria ( $p > 0.05$ ), durante el periodo experimental.

Tabla 3. Frecuencia ventilatoria ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción.

	EFFECTOS FIJOS	ESTIMADOR	ERROR ESTÁNDAR	Z- VALOR	P- VALOR	SIGNIFICANCIA
	Intercepto	4.47	0.03	126.04	<0.05	***
SISTEMA	CS	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SS	-0.01	0.05	-0.22	0.82	
FENOTIPO	P	Ref	Ref	Ref	Ref	
	R	0.03	0.04	0.70	0.47	
SISTEMA FENOTIPO	CSP	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SSR	-0.00	0.07	-0.04	0.96	

#### 4.4.2. Glucosa

La prueba de ANOVA revela que no existen diferencias significativas entre los sistemas ( $F_{(1, 32)} = 1.45$ ;  $p=0.23$ ), fenotipo de comportamiento ( $F_{(1, 32)} = 0.06$ ;  $p=0.79$ ), y su interacción ( $F_{(1, 32)} = 0.24$ ;  $p=0.62$ ), durante el periodo experimental.

#### 4.5. Bienestar animal

##### 4.5.1. Erosión de aleta dorsal

En la tabla 4 se puede observar que no existe diferencias significativas entre los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción en la escala de erosión en la aleta dorsal ( $p>0.05$ ) durante el estudio.

Tabla 4. Erosión de aleta dorsal ajustada por la distribución de Poisson de los sistemas, fenotipo de comportamiento y su interacción.

	EFEKTOS FIJOS	ESTIMADOR	ERROR ESTÁNDAR	Z- VALOR	P- VALOR	SIGNIFICANCIA
	Intercepto	4.44	0.26	1.65	<0.05	***
SISTEMA	CS	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SS	0.06	0.37	0.18	0.85	
FENOTIPO	P	Ref	Ref	Ref	Ref	
	R	-0.24	0.40	-0.59	0.54	
SISTEMA FENOTIPO	CSP	Ref	Ref	Ref	Ref	
	SSR	0.01	0.55	0.032	0.97	

## **4.6. Variables zootécnicas**

### **4.6.1. Peso**

La prueba de U Mann-Whitney indica que no existen diferencias significativas en el peso entre los sistemas ( $U= 121.00$ ;  $p=0.20$ ) y los fenotipos de comportamiento ( $U= 113.50$ ;  $p=0.12$ ). La prueba de Kruskal-Wallis indica que la interacción sistema fenotipo de comportamiento no mostró diferencias significativas durante el estudio ( $K-W = 5.67$ ;  $p= 0.12$ ).

### **4.6.2. Longitud total**

La prueba de U Mann-Whitney indica que no existen diferencias significativas en la longitud total entre los sistemas ( $U= 155.00$ ;  $p=0.83$ ) y los fenotipos de comportamiento no indicó diferencias significativas ( $U= 121.00$ ;  $p=0.18$ ). La prueba de Kruskal-Wallis muestra que no existen diferencias significativas en la interacción sistema fenotipo de comportamiento ( $K-W = 3.75$ ;  $p= 0.28$ ).

## V. DISCUSIÓN

Los resultados del estudio revelan que los valores observados de las variables físicoquímicas en ambos sistemas, específicamente el oxígeno disuelto y el nitrito muestran diferencias significativas. Ahmed *et al.*, (2020) menciona que el oxígeno disuelto es un indicador primario de la calidad del agua y del bienestar de los peces. Con base en lo expuesto por Sipaúba-Tavares *et al.*, (2010) y Francis-Floyd (2011), se recomienda una concentración de (5 mg/L) de OD para una salud óptima de los peces y de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, en las tinas con sistema acuapónico el promedio registrado fue de (6.75 mg/L) siendo este valor establecido como óptimo para un crecimiento exitoso en peces.

Estudios han demostrado que los sistemas de recirculación tienden a mantener los niveles de oxígeno más elevados debido a las prácticas avanzadas de manejo del agua y la aireación que se implementan para mantener la calidad del agua y optimizar las condiciones para los organismos acuáticos (Timmons *et al.*, 2002). Esto podría explicar la diferencia observada respecto a los sistemas cerrados, que dependen más de la aireación natural (Boyd y Tucker, 1998). Los resultados del sistema cerrado estuvieron dentro del rango óptimo requerido para la tilapia, tanto para su desarrollo como bienestar, gracias a condiciones controladas que permiten mantener los niveles mínimos de oxígeno disuelto adecuados para esta especie, como lo reportaron estudios sobre el desempeño de la tilapia en sistemas cerrados, (Makori *et al.*, 2017).

Según la FAO (2018), los valores de nitritos tanto para sistemas acuapónicos como sistemas cerrados deben ser menores a 1 mg/L, por lo tanto, los resultados de esta investigación en los tratamientos con sistema acuapónico están muy por debajo del rango mínimo, siendo el valor promedio (0.65 mg/L), lo que significa que no hubo niveles tóxicos de nitritos que interfirieran con la habilidad de los peces para absorber oxígeno. Este resultado muy posiblemente es debido a que, en sistemas de acuapónica, a diferencia de otros sistemas, se encuentren concentraciones más altas de bacterias nitrificantes. Estas bacterias desempeñan un papel crucial al convertir el amonio ( $\text{NH}_3$  Y  $\text{NH}_4^+$ ) en nitrito ( $\text{NO}_2$ ) y luego en nitrato ( $\text{NO}_3$ ), formando

parte esencial del ciclo del nitrógeno (Southern Regional Aquaculture Center, 1997). Por el contrario de las tinajas con sistema cerrado el valor promedio fue de (1.18 mg/L), superando así el límite recomendado, lo que indica que los resultados obtenidos en esta investigación exponen importantes diferencias en los niveles de nitritos entre ambos sistemas de cultivo. Nelson, (2008) menciona que los sistemas acuapónicos facilitan una eliminación más eficiente de nitritos a través de la constante renovación del agua, ya que estos desechos de los peces funcionan como una fuente de alimento para las plantas y éstas a su vez, actúan como un filtro natural del agua en la que viven. En cambio, en sistemas cerrados, la materia orgánica degradada aumenta la turbidez y produce una cantidad apreciable de amonio, nitrito y nitrato, contribuyendo a la diferencia observada (Hutchinson *et al.*, 2004; Galli, 2007).

Por otro lado, la ausencia de diferencias significativas en la temperatura y pH, indica que estos parámetros se mantuvieron relativamente constantes entre los tratamientos, siendo los resultados aceptables dentro del rango para la especie. (Asiain *et al.*, 2011).

Al-Asgah y Ali, (2011) mencionan que la temperatura es un parámetro fundamental, debido a que afecta el crecimiento y el consumo de oxígeno, teniendo influencia directa con buenos rendimientos en la producción acuícola, por lo tanto, los resultados obtenidos fueron satisfactorios durante el periodo experimental. A su vez tanto la conductividad eléctrica como la concentración de sólidos disueltos totales, no mostraron diferencias significativas, manteniéndose en los rangos óptimos para ambos tratamientos (Payne, 1983). Ambos parámetros (EC y TDS) por su parte, podrían estar más influenciados por la calidad inicial del agua utilizada en ambos sistemas, lo que explicaría la falta de variabilidad significativa (Boyd, 2015).

En la concentración de amoniaco no se encontró diferencia significativa, y estuvieron con un valor alto reportado como peligroso para tilapia (<1.0 mg/L) (Kubitza, 2000). La concentración letal es aquella superior a los 1 mg/L en los organismos juveniles, cuando se combina con bajas concentraciones de oxígeno disuelto (El-Sayed, 2006). A pesar de que la concentración promedio de ambos

sistemas fue de 1.17 mg/L se puede considerar que no fue letal debido a que en ambos sistemas se reportaron valores altos de oxígeno disuelto y que la concentración letal del amoníaco citada para los peces varía de 0.2 a 2 mg/L, según Ismiño y Lima, (2002).

Por otro lado con los resultados del nitrato ( $\text{NO}_3$ ) que aunque no se obtuvo diferencias significativa, ambos tratamientos estuvieron por debajo del valor reportado como seguro para tilapia (Nicovita, s.f; Southern Regional Aquaculture Center, 2009), Es importante destacar que estos resultados de amonio, nitrito y nitrato y el color pardo-verdoso de las tinas, fueron indicadores de un adecuado establecimiento de bacterias nitrificantes, así como la presencia de microalgas que menudo suministran oxígeno (Kubitza, 2016).

Los resultados indican que no existen diferencias significativas entre los sistemas en la prueba de latencia para entrar a la primera zona y el tiempo de congelación de los peces entre los dos sistemas, ni en los fenotipos de comportamiento. Esto sugiere que, tanto en sistemas cerrados como en acuapónicos, los peces proactivos y reactivos no muestran diferencias notables en estos comportamientos específicos. Un estudio realizado por Smith *et al.* (2020), muestra resultados similares, donde no se encontraron diferencias significativas en estos comportamientos en diferentes sistemas de acuicultura.

En la variable de número de transiciones, se observó diferencia significativa, en la interacción entre sistema y el fenotipo de comportamiento reactivo. Este resultado indica que los peces reactivos que están en sistemas acuapónicos tienen una mayor cantidad de transiciones, que los que están en sistemas cerrados. Lo que podría estar relacionado con la mayor complejidad y dinamismo del sistema acuapónico, que puede influir en el comportamiento de los peces reactivos, haciendo que sean más propensos a moverse entre zonas (Jones *et al.*, 2018). Por otro lado, se identificó una diferencia significativa en la interacción entre sistema acuapónico y los peces reactivos. Los resultados observaron muestran mayor número de transiciones en peces reactivos que se encuentran en sistemas acuapónicos que en sistemas cerrados. Investigaciones previas han demostrado que ambientes más

enriquecidos pueden favorecer comportamientos más exploratorios y activos en peces reactivos (Brown *et al.*, 2019). La mayor estimulación presente en sistemas acuapónicos podría estar incentivando a los peces reactivos a moverse más entre zonas, en comparación con los sistemas cerrados más monótonos.

En el resultado de la prueba de restricción no se obtuvieron diferencias significativas entre sistemas, ni en la interacción sistemas fenotipos, sin embargo, entre fenotipos de comportamiento existe diferencias significativas. La latencia para realizar el primer movimiento o intento de escape, fue menor en individuos que presentaron una conducta de personalidad proactiva que en aquellos individuos denominados como reactivos, como se ha corroborado en otras investigaciones con tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), en donde la latencia para realizar el primer intento de escape fue menor en individuos proactivos que reactivos (Núñez *et al.*, 2021).

Resultados similares se reportaron en una investigación realizada por Castanheira *et al.*, (2015), donde se encontró que los peces con comportamiento proactivo exhibieron tiempos más breves antes de intentar escapar por primera vez en comparación con aquellos con comportamiento reactivo. En el estudio mencionado, se evidenció que ciertos factores, como el contexto social, pueden influir en la consistencia del fenotipo de comportamiento detectado mediante la prueba de restricción. Los investigadores mantuvieron grupos con individuos de comportamientos fenotípicos homogéneos y otros con una mezcla de fenotipos, observando que solo se encontró consistencia en los grupos heterogéneos.

Al no haber diferencia significativa en el número total de movimiento entre fenotipos de comportamiento ni entre sistemas, sugiere que la prueba de restricción provee resultados similares, queriendo decir que los individuos frente a un estrés agudo, pero breve, de anoxia, es similar entre los fenotipos de comportamiento, estando de acuerdo con Hvas *et al.*, (2021), concluyendo que la prueba de restricción puede ser válida para diferentes sistemas acuícolas.

La frecuencia ventilatoria fue similar entre sistemas acuapónicos y sistemas cerrados. No se observó que el tipo de sistema incrementara la respuesta de la frecuencia ventilatoria, indicando la ausencia de estrés relacionado al tipo de

sistema o fenotipo de comportamiento, este es un hallazgo interesante si consideramos que la frecuencia ventilatoria es un parámetro crucial para evaluar el impacto del estrés ambiental en la fisiología respiratoria de los peces (Gilmour *et al.*, 2020). Siendo esta una respuesta del sistema nervioso simpático que se incrementa rápidamente en respuesta a un factor estresante (Barreto y Volpato, 2011).

Los resultados de las pruebas de glucosa demostraron que no existen diferencias significativas entre la interacción sistema fenotipo de comportamiento durante el periodo experimental. Este resultado es consistente con investigaciones previas que sugieren que los niveles de glucosa en sangre de peces pueden no verse afectados significativamente por el tipo de sistemas de acuicultura en el que se encuentren, ni por el fenotipo de comportamiento. Anderson *et al.*, (2017) encontró que los niveles de glucosa en peces no variaron significativamente entre diferentes tipos de sistemas acuícolas, indicando que el entorno inmediato o el manejo del sistema pueden no influir directamente en esta variable fisiológica.

Además, la ausencia de diferencias significativas en los niveles de glucosa entre los fenotipos de comportamiento proactivo y reactivo sugiere que la respuesta metabólica a los estresores ambientales y de manejo podría ser similar en ambos grupos. Este resultado es congruente con el trabajo de Barton, (2002), quien reportó que los niveles de glucosa en respuesta al estrés no mostraron variaciones significativas entre diferentes tipos de comportamientos en peces, lo que podría deberse a mecanismos de regulación endocrina similares entre fenotipos.

Los peces alojados en ambos sistemas no mostraron mayores niveles de daño de aleta dorsal. Lo que viene siendo un indicador simple y rápido del bienestar de los peces, en relación con la calidad de vida o el estado del bienestar de los peces (Conte 2004; Huntingford *et al.*, 2006; Ashley 2007).

Los sistemas acuapónicos y cerrados revelaron resultados semejantes de desempeño zootécnico de peso y longitud estos resultados están en línea con un estudio realizado, donde Pottinger, (2006) informó un hallazgo similar al criar dos líneas de trucha arco iris por separado.

Esto quiere decir que los resultados observados son coherentes con investigaciones previas que han examinado el impacto de diferentes sistemas de acuicultura en el crecimiento de los peces. Una investigación realizada por Martins *et al.*, (2011) encontró que los sistemas de recirculación y sistemas tradicionales de flujo continuo no mostraron diferencias significativas en el crecimiento de los peces. Esto sugiere que los sistemas de acuicultura bien manejados pueden proporcionar condiciones adecuadas para el crecimiento de los peces, independientemente del tipo de sistema. Por otra parte, la ausencia de diferencias significativas en el peso y la longitud entre los fenotipos de comportamiento proactivo y reactivo sugiere que ambos grupos de peces pueden crecer de manera similar en condiciones de acuicultura controladas. Según Huntingford *et al.*, (2010), aunque los peces con diferentes fenotipos de comportamiento pueden mostrar variaciones en su respuesta al estrés y en sus patrones de alimentación, estos factores no necesariamente resultan en diferencias de crecimiento significativas cuando se mantienen en entornos optimizados.

## VI. CONCLUSIONES

El sistema acuapónico mostró rangos óptimos en los parámetros fisicoquímicos del agua en la *O. niloticus*.

Los fenotipos de comportamiento proactivos y reactivos mostraron niveles similares de bienestar en el sistema acuapónico, lo que indica que esta tecnología proporciona un ambiente adecuado para diferentes tipos de comportamiento en los peces.

No se observaron diferencias significativas en el desempeño productivo entre los fenotipos de comportamiento en el sistema acuapónico, lo que sugiere que ambos tipos de peces pueden adaptarse y prosperar en este entorno de producción.

## VII. RECOMENDACIONES

Los sistemas acuapónicos proporcionan oportunidades para aumentar la productividad en la acuicultura, mientras se mejoran los ingresos gracias al valor añadido de la integración de cultivos en el mismo sistema. Además de esto, se contribuye a la conservación de un recurso natural cada vez más limitado: el agua.

Tomando en consideración que la instalación donde se llevó a cabo esta investigación no contaba con una fuente de agua potable, y que en ocasiones el agua suministrada presenta contaminantes visibles como lodo y otras sustancias, se propone que para futuros estudios complementar esta investigación con pruebas microbiológicas detalladas del agua suministrada, que permitan identificar la presencia de microorganismos patógenos o indicadores de contaminación bacteriana. Además, sería recomendable llevar a cabo análisis químicos para determinar la concentración de metales pesados y otros compuestos químicos que podrían afectar la calidad del agua utilizada en el estudio. Estos datos adicionales fortalecerán la validez de los resultados obtenidos y proporcionarán una visión más completa de las condiciones ambientales en las que se desarrolló la investigación.

Se recomienda realizar como continuación de este proyecto, un estudio donde se evalué la calidad nutricional del producto final, analizando la composición nutricional de la tilapia cultivada en sistemas acuapónicos en comparación con aquellos criados en métodos convencionales (sistema tradicional), evaluando perfiles de ácidos grasos, contenido de proteínas y otros nutrientes claves.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abusin, A., y Mandikiana, B. (2020). Towards sustainable food production systems in Qatar: Assessment of the viability of aquaponics. *Global Food Security*, 26, 100349.
- Ahmed, U., Mumtaz, R., Anwar, H., Mumtaz, S., y Qamar, A. (2020). Water quality monitoring: From conventional to emerging technologies. *Water Supply*, 20(1), 28-45.
- Al-Asgah, N., y Ali, A. (2011). Growth performance and body composition of *Oreochromis niloticus* reared at different water temperatures. *Annales de Zootechnie*, 46(5), 331–338.
- Anderson, M., Brown, P., y Thompson, J. (2017). Effects of different aquaculture systems on fish physiology. *Aquaculture Research*, 48(9), 3456-3465.
- Araño, C. (1998). *Forraje verde hidropónico y otras técnicas de cultivos sin tierra*. Editado por el propio autor. Provincia de Buenos Aires, Argentina. p 397 .
- Ashley, P. (2007). Bienestar de los peces: Problemas actuales en la acuicultura. *Applied Animal Behaviour Science*, 104(3-4), 199–235.
- Asiain, H., Fernández, D., Reta, M., y Suárez, S. (2011). *Manual de acuicultura para la producción de mojarra tilapia (Oreochromis spp.)*. Colegio de Postgraduados. 32 p.
- Baradad Oca, J., y Llorà Masaló, I. (2009). *Diseño de tanques en acuicultura intensiva*. Fundación Observatorio Español de Acuicultura (Fundación OESA) y Sociedad Española de Acuicultura (SEA). 64, pp 14-15 ed.
- Barreto, R., y Volpato, G. (2011). Ventilation rates indicate stress-coping styles in Nile tilapia. *Journal of Bioscience*, 36(6), 851-855.
- Barton, B. A. (2002). Stress in fishes: A diversity of responses with reference to changes in circulating corticosteroids. *Integrative and Comparative Biology*, 42(3), 517-525.

Bautista, C., y Ruiz, V. (2011). Calidad de agua para el cultivo de tilapia en tanques de geomembrana. *Revista Fuente*, 8(3), 10-14.

Boyd, C., y Tucker, C. S. (1998). *Pond aquaculture water quality management*. Springer.

Boyd, C. (2015). *Water quality: An introduction* (2.<sup>a</sup> ed.). Springer International Publishing. 698 p.

Bravo, S. (2019). La importancia del bienestar animal en la producción del salmón. *Salmonexpert*.

Brown, R., Smith, K., y Taylor, P. (2019). Environmental enrichment and its effects on fish behavior in aquaculture settings. *Aquaculture Environment Interactions*, 11(2), 223-230.

Calderer, A. (2001). *Influencia de la temperatura y la salinidad sobre el crecimiento y consumo de oxígeno de la dorada (Sparus aurata L.)* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona].

Candarle, P. (2011). *Técnicas de acuaponia*. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC), Dirección de Acuicultura, p 47.

Calderon, M. (2002). Las ciencias del comportamiento animal. *En buenas manos*. Sección Medicina del Comportamiento, Departamento de Etología, Bioética y Bienestar Animal, ULS-FUSM, Bogotá, Colombia.

Cantor, A. (2007). *Manual de producción de tilapia*. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla.

Castanheira, M., Herrera, M., Costas, B., Conceição, L., y Martins, C. (2013). Linking cortisol responsiveness and aggressive behaviour in gilthead seabream (*Sparus aurata*): Indication of divergent coping style. *Applied Animal Behaviour Science*, 143, 75-81.

Castanheira, M., Conceição, L., Millot, S., Rey, S., Bégout, M., Damsgard, B., Kristiansen, T., Höglund, E., Øverli, Ø., y Martins, C. (2015). Coping styles in farmed fish: Consequences for aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 7(1), 1-19.

Claros, J. (2012). *Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal.*

Cervantes F., Peres J., Gómez J. (2000). Avances en la eliminación biológica del nitrógeno en las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42:73-82 Asociación Latinoamericana de Microbiología.

Conte, F. (2004). El estrés y el bienestar de los peces cultivados. *Applied Animal Behaviour Science*, 86, 205-223.

Dediu, I., Cristea, V., y Xiaoshuan, Z. (2012). Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. *African Journal of Biotechnology*, 11(9), 2349-2358.

El-Sayed, A. (2006). *Tilapia culture*. CABI, Wallingford. 274 pp.

El-Sayed, A. (2019). *Tilapia culture*. Academic Press.

Engelsma, Y., Huising, O., Van Muiswinkel, B., Flik, G., Kwang, J., Savelkoul, H., y Verburg-van Kemenade, B. (2002). Neuroendocrine-immune interactions in fish: A role for interleukin-1. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 87(3-4), 467-479.

Escaler, M., y Mujeriego, R. (2001). Eliminación biológica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante un proceso discontinuo de fangos activados. *Ingeniería del Agua*, 8(1), 67-77.

Espino, M. (2003). *Estudio de nitrificación-desnitrificación de un efluente secundario de tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de reactores biológicos en serie.*

Estol, L. (2008). Bienestar animal.

FAO. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*. FAO.

FAO. (2018). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible*. Roma, 233 p.

FAO. (2018). *Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala: Cultivo integral de peces y plantas*. FAO.

FAO. (2020). *FishStat Plus - Universal software for fishery statistical time series*. FAO.

FAO. (2024). *Oreochromis niloticus*. Cultured Aquatic Species Information Programme. Texto de Rakocy, J. E. En: *Pesca y acuicultura*. FAO.

Farm Animal Welfare Council. (1996). *Report on the welfare of farmed fish*. Farm Animal Welfare Council, 52 pp.

Flik, G., Klaren, M., Van den Burg, E. H., Metz, R., y Huising, M. (2006). CRF and stress in fish. *General and Comparative Endocrinology*, 146, 36-44.

Foley, C., Bath, F., Dickinson, A., y Tucker, H. (1973). *Dairy cattle: Principles, practices, problems, profits*. Lea y Febiger.

Francis-Floyd, R. (2011). Mycobacterial infections of fish. *Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication No. 4706*.

Froese, R., y Pauly, D. (2023). *FishBase*. World Wide Web electronic publication.

Galli, O., y Sal, F. (2007). *Sistemas de recirculación y tratamiento de agua*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos-CENADAC. 1-37.

García Rivas, T., González, R., y Murillo, A. (2021). De la nitrificación al control de enfermedades.

Gilmour, K., Perry, S., y Farrell, P. (2020). The respiratory system. En: *Fish Physiology: The Multifunctional Gut of Fish* (Vol. 36, pp. 1-46). Academic Press.

Google Maps. (2024). Coordenadas geográficas de módulo avícola.

Guzmán, A. (2001). *Proyecto para el establecimiento de un centro de cultivo de Tilapia Roja en la provincia de Esmeraldas, cantón San Lorenzo, recinto La Florida, Quito-Ecuador*, pp. 4-34.

Hacker, J., y Minson, D. (1972). Varietal differences in vitro dry matter digestibility in *Setaria* and the effects of site, age and season. *Australian Journal of Agricultural Research*, 23(6), 959-967.

Hernández, M. (2019). Los sistemas biofloc: Una estrategia eficiente en la producción acuícola. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 14(1), 70-99.

Holdridge Life Zones. (2024). *Holdridge life zones*. STRI Data Portal.

Huntingford, F. (1976). The relationship between antipredator behaviour and aggression among conspecifics in the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus*. *Animal Behaviour*, 24, 245–260.

Huntingford, F., Adams, C., Braithwaite, V., Kadri, S., Pottinger, T., Sandoe, P., y Turnbull, J. (2006). Problemas actuales en el bienestar de los peces. *Journal of Fish Biology*, 68(1), 332–372.

Huntingford, F., Adams, C., y Braithwaite, V. (2010). Behavioral syndromes and stress response: Do bold individuals cope better with stress? *Behavioral Ecology*, 21(3), 388-393.

Hutchinson, W., Jeffrey, M., O'Sullivan, D., Casement, D., y Clarke, S. (2004). *Recirculating aquaculture systems: Minimal standards for design, construction, and management*. Inland Aquaculture Association of South Australia Inc. 1 – 73.

Hvas, M., Stien, L., y Oppedal, F. (2021). The effect of fasting period on swimming performance, blood parameters, and stress recovery in Atlantic salmon post-smolts. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 255, 110913.

Ismiño, R., y Araujo-Lima, C. (2002). Efecto del amoníaco sobre el crecimiento de la gamitana, *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818). *Folia Amazónica*, 13(1-2), 41-47.

Iturbide, K. (2004). *Impacto de la Estación Acuícola de Amatitlán en el desarrollo de la tilapicultura en Guatemala* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC. 40 p.

Jiangu, X., Ying, L., Shaoron, C., y Xiangwen, M. (2006). Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision. *Aquacultural Engineering*, 35(3), 207-217.

Jones, G., Clark, L., y Thompson, R. (2018). The impact of aquaponic systems on fish behavior: A comparative study. *Journal of Aquaculture*, 39(4), 567-578.

Karazu, B., y Gülten, K. (2005). The acute toxicity of ammonia on tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) larvae and fingerlings. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, 29(2), 339-344.

Kemp, S., Gessel, H., Sandford, P., y Williams, J.G. (2006). The behaviour of Pacific salmonid smolts during passage over two experimental weirs under light and dark conditions. *River Research and Applications*, 22(4), 429-440.

Koolhaas, J., Korte, S., De Boer, S., Van Der Vegt, B., Van Reenen, G., Hopster, H., De Jong, I., Ruis, M., y Blokhuis, H. (1999). Coping styles in animals: Current status in behaviour and stress-physiology. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 23, 925-935.

Kubitza, F. (2000). *Tecnologia e planejamento na produção comercial*. Jundiaí, Brasil: Acqua Supre. 289 pp.

Kubitza, F. (2016). La correcta circulación del agua en los estanques acuícolas es crítica. *Acuicultura*, 19(3), 15-18.

Lewis, W., Yopp, J., Schramm, H., y Brandenburg, A. (1978). Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. *Transactions of the American Fisheries Society*, 107, 92-99.

Lorenz, K. (1958). The evolution of behavior. *Scientific American*, 199(6), 67-78.

- Mackenzie, S., Ribas, L., Pilarczyk, M., Morera, D., Kadrl, S., y Huntingford, F. (2009). Screening for coping style increases the power of gene expression studies. *PLOS ONE*, 4(4), e5314.
- Makori, A., Abuom, P., Kapiyo, R., Anyona, D., y Dida, G. (2017). Effects of water quality on fish growth and production in fishponds in Teso North Sub-County, Busia County. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 5(3), 25-30.
- Martins, M., Schrama, W., y Verreth, J. (2005). Inherent variation in growth efficiency of African catfish *Clarias gariepinus* juveniles. *Aquaculture Research*, 36, 868-875.1365-2109.
- Martins, C., Eding, E., y Verreth, J. (2011). The effect of recirculating aquaculture systems on the performance and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 261(1), 466-473.aquaculture.2006.07.034
- Martins, C, Schaedelin, F., Mann, M., Blum, C., Mandl, I., Urban, D., Grill, J., Wender, J., y Wagner, R. (2012). Exploring novelty: A component trait of behavioural syndromes in a colonial fish. *Behaviour*, 149(3-4), 215-231.
- Matus, H., Linares, J., Domínguez, A., Gaspar, G., y Lule, R. (2009). *Acuaponia, plantas y peces libres de químicos*.
- McDonald, P., y Edwards, D. (1988). *Animal nutrition* (4th ed.). Longman Scientific & Technical. New York.
- Merino, O., y Sal, F. (2007). *Sistemas de recirculación y tratamiento de agua*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos CENADAC. Santa Ana, Corrientes. 41p.
- Meyer, D. (1999). *La calidad del agua. Manual de introducción a la acuicultura*. Zamorano.
- Meyer, G. (2007). *Parámetros de crecimiento en tilapia del Nilo*. Zamorano.

Millot, S., Begout, L., y Chatain, B. (2009). Risk-taking behaviour variation over time in sea bass *Dicentrarchus labrax*: Effects of day-night alterations, fish phenotypic characteristics, and selection for growth. *Journal of Fish Biology*, 75, 1733-1749.

Muñoz, M. (2012). *Sistemas de recirculación acuapónicos*. *Informador Técnico*, 127.

Murphy, B. (1991). *Greener pastures on your side of the fence: Better farming with voisin grazing management* (2nd ed.). Arriba Publishing.

Nelson, L. (2008). *Aquaponics food production: Raising fish and plants* (1st ed.). Nelson and Pade, Inc. 218p.

Nicovita. (n.d.). *Manual de crianza de tilapia*.

Noble, C., Kadri, S., Mitchell, D., y Huntingford, F. (2008). Crecimiento, producción y daño de las aletas en presmolts de salmón atlántico 0+ enjaulados (*Salmo salar* L.) alimentados a) a pedido, o b) para un régimen de restricción de saciedad fijo: Datos de una granja comercial. *Revista de Acuicultura*.

Núñez, H., Vargas, R., Guerra, I., y Ramos, E. (2021). Efecto de la temperatura sobre el consumo de oxígeno en tilapias del Nilo con diferentes fenotipos de comportamiento. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 10(2), 1–18.

Olvera, N. (2005). *Guía práctica para el cultivo de la tilapia*. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Mérida, Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, SAGARPA, pp 1-36.

Øverli, Ø., Pottinger, T., Carrick, T., Øverli, E., y Winberg, S. (2001). Brain monoaminergic activity in rainbow trout selected for high and low stress responsiveness. *Brain, Behavior and Evolution*, 57, 214-224.

Øverli, Ø., Korzan, W., Larson, E., Winberg, S., Lepage, O., Pottinger, T., Renner, K., y Summers, H. (2004). Behavioral and neuroendocrine correlates of displaced aggression in trout. *Hormones and Behavior*, 45, 324-329.

Øverli, Ø., Sørensen, C., Pulman, K. G. T., Pottinger, T. G., Korzan, W., Summers, C. H., y Nilsson, G. E. (2007). Evolutionary background for stress-coping styles:

Relationships between physiological, behavioural, and cognitive traits in non-mammalian vertebrates. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 31, 396–412.

Pankhurst, N., y Van Der Kraak, G. (1997). Effects of stress on reproduction and growth of fish. In G. K. Iwama, A. D. Pickering, J. P. Sumpter, & C. B. Schreck (Eds.), *Fish stress and health in aquaculture*, pp. 73-93.

Payne, A. (1983). Estuarine and salt tolerant tilapias. In *CENDEPESCA*s (Ed.), *Manual de reproducción de cultivo de tilapia*, pp. 1-68.

Peña, J. (2011). *Evaluación de la producción de chilote en el cultivo de maíz (Zea mays, L) variedad HS-5G utilizando sustratos mejorados y determinación de los coeficientes “Kc” y “Ky”, bajo riego* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. p.18-19

Person-Le Ruyet, J., Labbé, L., Le Bayon, N., Sévère, A., Le Roux, A., Le Delliou, H., y Quémener, L. (2008). Efectos combinados de la calidad del agua y la densidad de población sobre el bienestar y el crecimiento del arcoíris trucha (*Oncorhynchus mykiss*). *Agua Recurso Vivo*, 21, 185–195.

Pickering, D., Pottinger, T., Carragher, J., y Sumpter, P. (1987). The effects of acute and chronic stress on the levels of reproductive hormones in the plasma of mature male brown trout, *Salmo trutta* L. *General and Comparative Endocrinology*, 68, 249-259.

Popma, T., y Lovshin, L. (2000). *Panorama de la acuicultura*. Auburn, USA, pp. 1-40.

Pottinger, T. (2006). Context dependent differences in growth of two rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) lines selected for divergent stress responsiveness. *Aquaculture*, 256, 140-147.

Qiang, J., He, H., Yang, H., Xu, P., Habte-Tsion, H., Ma, X., y Zhu, Z. (2016). The changes in cortisol and expression of immune genes of GIFT tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) at different rearing densities under *Streptococcus iniae* infection. *Aquaculture International*, 24(5), 1365-1378.

Rakocy, J. (1999). The status of aquaponics Part 1. *Aquaculture Magazine*, July-August, 83-88.

Rakocy, E., Masser, P., y Losordo, T. (2006). *Recirculating aquaculture tank production system: Aquaponics—Integrating fish and plant culture*. Oklahoma State University. P 16.

Réale, D., y Dingemanse, N. (2010). Selection and evolutionary explanation for the maintenance of personality differences. In D. Buss & P. Hawley (Eds.), *The evolution of personality and individual differences* (pp. 115-132). Oxford University Press.

Robertson, D., Peña, J., Posada, J., y Claro, R. (2019). *Peces costeros del Gran Caribe: Sistema de información en línea* (Versión 2.0). Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, República de Panamá.

Rodero, E. (1999). Principios del comportamiento. In F. Peña Blanco, M. Herrera García, E. Rodero, & M. J. Gutiérrez Cabezas (Eds.), *Ganadería ecológica: Gestión de explotaciones en zonas desfavorecidas. Etología ganadera en sistemas extensivos* (pp. 81-90). Dpto. Producción Animal de la Univ. de Córdoba.

Rodríguez, A. (2003). *Cómo producir con facilidad, rapidez y óptimos resultados forraje verde hidropónico* (113 p.). Ed. DIANA.

Ruiz-Gómez, M., Kittilsen, S., Høglund, E., Huntingford, F., Sørensen, C., y Pottinger, T. (2011). Behavioral plasticity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with divergent coping styles: When doves become hawks. *Hormones and Behavior*, 54(4), 534–538.

Saavedra, M. (2006). *The University of Rhode Island*. Universidad Centroamericana. Managua, Nicaragua. Departamento de Tecnología y Arquitectura. Facultad de Ciencia, Tecnología y Ambiente. Universidad Centroamericana. Managua, Nicaragua.

Saavedra, M. (2006). *Manejo del cultivo de tilapia*.

Silva, P., Martins, C., Engrola, S., Marino, G., Øverli, Ø., y Conceição, L. (2010). Individual differences in cortisol levels and behavior of Senegalese sole (*Solea*

*senegalensis*) juveniles: Evidence for coping styles. *Applied Animal Behaviour Science*, 124, 75–81.

Sipaupá-Tavares, L., Lourenço, E., y Braga, F. (2010). Water quality in six sequentially disposed fishponds with continuous water flow. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 32(1), 9–15.

Smith, A., Jones, C., y Brown, E. (2020). Behavioral responses of fish in different aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 51(7), 1234–1245.

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, Vol. 1, No. 589, pp. 1–288).

Southern Regional Aquaculture Center. (1997). *Nitrite in fishponds* (SRAC Publication No. 462). Mississippi.

Southern Regional Aquaculture Center. (2009). *Tank culture of tilapia* (SRAC Publication No. 282). Stoneville, Mississippi.

Shreck, C. (2010). Stress and reproduction: The roles of allostasis and hormesis. *General and Comparative Endocrinology*, 165, 549–556.

Timmons, M., Ebeling, J., Wheaton, F., Summerfelt, S., y Vinci, B. (2002). *Recirculating aquaculture systems*. Cayuga Aqua Ventures.

Tsang, S., y Quintanilla, M. (2008). *Manual sobre producción de tilapia*. CENDEPESCA.

Tyson, R., Simonne, E. H., White, J. M., y Lamb, E. M. (2004). Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: The pH levels. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* (Vol. 117, pp. 79–83).

Ulloa, M., León, C., Hernández, F., y Chávez, R. (2005). Evaluación de un sistema experimental de acuaponía. *Avances en investigación agropecuaria*, 9(1), 1–5.

Vyzamal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478–490.

Wendelaar, B. (1997). The stress response in fish. *Physiological Reviews*, 77, 591–625.

World Renew y Diaconía Nacional. (2020). *Manual técnico de acuaponía*. Eurosan Occidente.

Ye, R., y Thomas, S. (2001). Microbial nitrogen cycles: Physiology, genomics, and applications. *Current Opinion in Microbiology*, 4(4), 307-312.

## IX. ANEXOS



Figura 10. Desarrollo del sistema radicular del maíz a los dieciocho días en el sistema acuapónico.



Figura 11. Desarrollo del sistema radicular del maíz a los siete días en el sistema acuapónico.



Figura 12. Kits de etiquetas implante visible tipo elastómero (VIE).

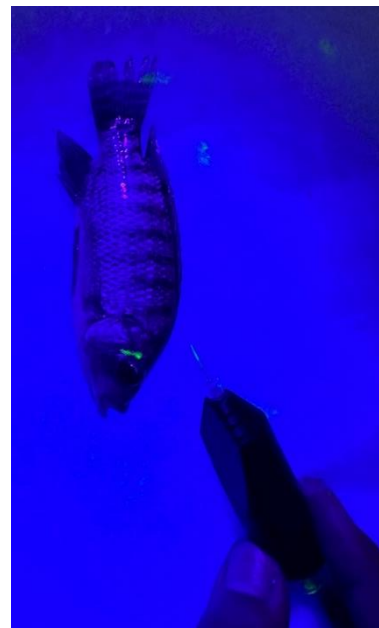


Figura 13. Marcación de peces proactivos.

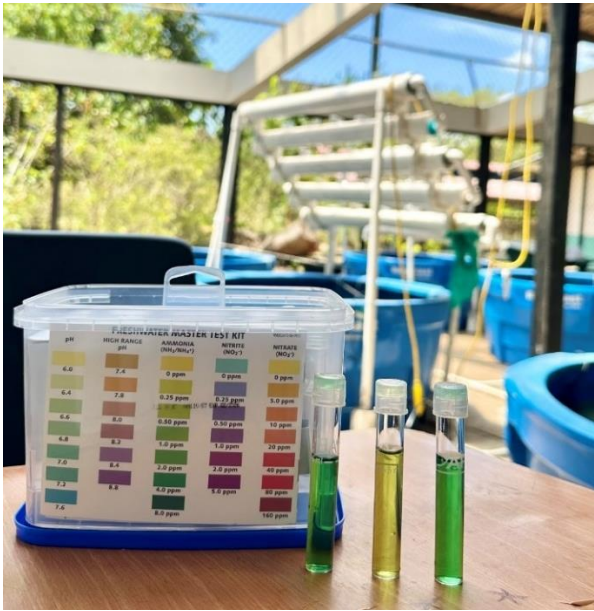


Figura 14. Reactivo utilizado en la prueba de amonio de los parámetros fisicoquímicos del agua.



Figura 15. Reactivo utilizado en la prueba de nitrito de los parámetros fisicoquímicos del agua.



Figura 16. Reactivo utilizado en la prueba de nitrato de los parámetros fisicoquímicos del agua.



Figura 17. Extracción de glucosa.



Figura 18. Prueba de frecuencia ventilatoria.



Figura 19. Prueba de actividad.



Figura 20. Observación de daño en la aleta dorsal.