

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE CIENCIAS PECUARIAS

**ESTUDIO COMPARATIVO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE
AGUA (RAS) Y UN SISTEMA TRADICIONAL SOBRE EL
DESEMPEÑO PRODUCTIVO DE TILAPIA DEL NILO**
(Oreochromis niloticus).

POR:

LUIS A. CASTRO R.

4-792-2498

DAVID, CHIRIQUÍ
REPÚBLICA DE PANAMÁ

2023

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE CIENCIAS PECUARIAS

ESTUDIO COMPARATIVO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA (RAS) Y UN SISTEMA TRADICIONAL SOBRE EL DESEMPEÑO PRODUCTIVO DE TILAPIA DEL NILO (*Oreochromis niloticus*)

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 POR LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

APROBADO:

MIEMBROS	APROBACIÓN
DR. REYNALDO VARGAS	<hr/> DIRECTOR
DR. REGGIE GUERRA	<hr/> COMITÉ
MSC. EFRAÍN STAFF	<hr/> COMITÉ

DAVID, CHIRIQUÍ
REPÚBLICA DE PANAMÁ

2023

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a Dios, por llenarme de bendiciones en cada paso y por haberme permitido llegar hasta este momento. Por ser mi guía durante esta trayectoria y lograr culminar uno de mis objetivos.

A toda mi familia. Principalmente, a mis padres y a mi hermana por el cariño y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de toda mi vida. Por estar mi lado en todo momento brindándome sus valiosos consejos.

A mis amigos, compañeros y a todas esas personas que de alguna u otra forma han contribuido para lograr uno de mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado las fuerzas y ganas de seguir adelante sin decaer, por otorgarme sabiduría, paciencia para guiar el timón de mi vida durante mi carrera profesional.

A mi madre Verónica Ríos, por ser apoyo incondicional durante toda mi vida, por acompañarme en cada larga y agotadora madrugada de estudio y trabajo. A mi padre Luis Castro, por ser pilar fundamental, por fortalecerme con sus valiosos consejos brindados durante mi vida y carrera profesional. A mi hermana Alejandra S. Castro, por su apoyo incondicional.

A mi asesor, Dr. Reynaldo E. Vargas, por su excelente orientación, valiosos consejos y apoyo para la finalización de mi trabajo de graduación. Al Lic. Adair Quiroz, jefe de Estación Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP) Gualaca, por brindarme la oportunidad de desarrollar mi trabajo de tesis en esta institución y su orientación durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Alex Ríos, por su orientación y valiosa ayuda durante este trabajo de tesis; a la Lic. Wendy Orocú, por toda la ayuda brindada.

A todo el personal de la Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP), por su meritoria ayuda durante la realización de este trabajo.

A mis amigos y familiares, que estuvieron alentándome para culminar con éxito este trabajo.

Gracias...

Luis Alejandro Castro Ríos

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Tipos de Sistemas de Cultivos	4
2.1.1. Generalidades del Sistema Tradicional o Flujo Continuo	4
2.1.2. Generalidades De los Sistemas Recirculación de Agua (RAS)	5
2.1.3. Origen de los Sistemas RAS	6
2.2 Componentes de un RAS.....	6
2.2.1 Remoción de Solidos:	7
2.2.2 Biofiltración:	8
2.2.3 Aireación u Oxigenación:	8
2.2.4 Desgasificación:.....	8
2.0.6. Dinámica de Desechos en un RAS.....	9
2.3 Estructuras para el Tratamiento Mecánico	10
2.3.1 Filtración Biológica.....	10
2.4 Calidad de Agua.....	13
2.5. Parámetros de Calidad de Agua	14
2.5.1 Oxigeno	14
2.5.2. Amonio.....	14
2.5.3. Nitrito	15
2.5.4. Nitrato	15
2.5.5. pH.....	15
2.5.6. Temperatura	16

2.5.7. Dureza	16
2.5.8. Salinidad	17
2.5.9 Total de solidos disueltos.....	17
2.6. Biología y Morfología de la Tilapia Del Nilo (O. Niloticus).	18
2.6.1. Rasgos Biológicos (FAO, 2010) (Figura 1)	18
2.6.2. Antecedentes	18
2.6.3. Nutrición.....	20
2.6.4 Producción.....	20
2.7. OBJETIVOS	22
2.7.1. Objetivo General	22
2.7.2. Objetivos Específicos.....	22
2.8. Hipótesis	22
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1. Área Geográfica	23
3.1.1. Abastecimiento de agua	23
3.2. Población.....	24
3.3. Periodo de Aclimatación.....	24
3.4. Parámetros Fisicoquímicos del agua	24
3.5. Periodo de Experimentación	24
3.6. Alojamiento.....	25
3.7. Tratamientos	25
3.8. RAS.....	25
3.9. Sistema tradicional	28

3.10 Variables evaluadas	28
3.10.1 Parámetros fisicoquímicos del agua	28
3.0.10.2. Indicadores de comportamiento.....	29
3.0.10.3. Indicadores de estrés.....	29
3.0.10.4. Indicadores de bienestar animal	29
3.10.2. Indicadores de desempeño zootécnico.....	30
a. Peso (g).....	30
b. Ganancia de peso (GP)	30
c. Tasa de crecimiento específico (SGR).....	30
d. Longitud (cm).....	30
3.11. Consumo de agua	30
3.12. Análisis estadístico.....	31
IV.RESULTADOS	32
4.1. Parámetros fisicoquímicos del agua.....	32
4.1.1. Oxígeno disuelto.....	32
4.1.2. Conductividad eléctrica.....	33
4.1.3. . Total de sólidos disueltos.....	34
4.1.4. pH.....	35
4.1.5. Temperatura	35
4.1.6. Amoníaco.....	35
4.1.7. Amonia.....	36
4.1.8. Nitrito	36
4.1.9. Nitrato	37

4.1.10. Fosfato.....	37
4.1.11. Tasa de remoción de amoniaco y nitrito en el sistema RAS.....	38
4.2. . Indicadores de comportamiento	38
4.2.1. Latencia para entrar en la primera zona	38
4.2.2. . Tiempo de congelamiento.....	39
4.2.3. Número de transiciones	39
4.2.4. Tiempo de permanencia en la parte superior del tanque.....	40
4.3. Indicadores de estrés	40
4.3.1. Frecuencia ventilatoria.....	40
4.4. Indicadores de bienestar animal.....	41
4.5. Indicadores de desempeño zootécnico	41
4.5.1. Peso.....	41
4.5.2. Ganancia de peso.....	42
4.5.3. Tasa de crecimiento específico	42
4.5.4. Longitud total	42
4.6. Consumo de agua	43
V. DISCUSIÓN.....	44
VI. CONCLUSIÓN.....	51
VII. RECOMENDACIONES.....	52
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	53
IX. ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. RASGOS BIOLÓGICOS DE LA TILAPIA.....	18
FIGURA 2. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LA TILAPIA.....	21
FIGURA 3. ÁREA GEOGRÁFICA	23
FIGURA 4. DISEÑO DEL SEDIMENTADOR RADIAL.....	26
FIGURA 5. MATERIALES PARA LA FILTRACIÓN BIOLÓGICA.....	26
FIGURA 6. ESQUEMA DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA.....	27
FIGURA 7. IMAGEN REAL DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA..	27
FIGURA 8. SISTEMA TRADICIONAL.....	28
FIGURA 9. MEDIA \pm D.E., DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO ...	32
FIGURA 10. MEDIA \pm D.E., DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	33
FIGURA 11. MEDIA \pm D.E., DE TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS.	34
FIGURA 12. MEDIA \pm D.E., DE AMONÍACO.....	35
FIGURA 13. MEDIA \pm D.E., DE AMONIA.....	36
FIGURA 14. MEDIA \pm D.E., DE NITRITO.....	36
FIGURA 15. MEDIA \pm D.E., DE NITRATO	37
FIGURA 16. MEDIA \pm D.E., DE FOSFATO	37
FIGURA 17. MEDIA \pm D.E., DE LATENCIA PARA ENTRAR EN LA PRIMERA ZONA.....	38
FIGURA 18. MEDIA \pm D.E., DE TIEMPO DE CONGELAMIENTO	39
FIGURA 19. MEDIA \pm D.E., DE NÚMERO DE TRANSICIONES.....	39
FIGURA 20. MEDIA \pm D.E., DE TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA PARTE SUPERIOR DEL TANQUE.....	40

FIGURA 21. MEDIA \pm D.E., DE PESO	41
FIGURA 22. MEDIA \pm D.E., DE LONGITUD TOTAL	42
FIGURA 23. MEDIA \pm D.E., DE CONSUMO DE AGUA.....	43

ÍNDICE DE ANEXOS

IMAGEN 1. VISTA PANORÁMICA DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA...	59
IMAGEN 2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO.....	59
IMAGEN 3. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA VISTA LATERAL.....	59
IMAGEN 4. ANÁLISIS DE DATOS.....	60
IMAGEN 5. REACTIVOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA.....	60

RESUMEN

La necesidad de agua es una realidad que puede afectar la sostenibilidad de la acuicultura, por esta razón en el presente estudio nos propusimos como objetivo comparar un sistema de recirculación de agua (RAS) y un sistema tradicional sobre el desempeño productivo de alevines de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Se utilizaron 600 alevines de tilapia machos (300 por tratamiento), con un peso promedio de 18.72 ± 3.33 g y una longitud total de 12 ± 0.05 cm. Se utilizaron dos piletas de concreto de 12 m^3 (12.000 litros de volumen útil) con dimensiones de (4.20 m, x 3.10 m, x 1.20 m). La duración del ensayo fue de 75 días. Los resultados mostraron diferencias significativas en oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos, amoníaco, amonio, nitrito, nitrato y fosfatos ($p < 0.05$; $p < 0.001$). Mientras que, el pH y la temperatura no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$). La tasa de remoción de amoníaco y nitrito muestran que el sistema RAS redujo un 18% las concentraciones de amoníaco y un 7% las concentraciones de nitrito. Las variables de comportamiento, latencia para pasar a la primera zona, número de transiciones y tiempo de permanencia en la parte superior del tanque mostraron diferencias entre los sistemas ($p < 0.001$). El RAS no afectó las variables de estrés ni salud animal ($p > 0.05$). Sin embargo, las variables de desempeño productivo, peso, ganancia de peso y tasa de crecimiento específico mostraron mejor rendimiento en el RAS ($p = 0.005$). El RAS ahorró significativamente 450 m^3 de agua ($p < 0.001$). El RAS puede ser una alternativa sostenible para la producción de peces.

Palabras clave: Comportamiento, desempeño productivo, estrés, RAS, salud.

ABSTRACT

The necessity for water is a factor that could actually affect aquiculture's sustainability, due to that fact we focused this study on comparing a system that recirculates water (SRW) and a traditional system in terms of the productive development of Nile's tilapia fry (*Oreochromis niloticus*). 600 male tilapia fry were used (300 per treatment), with an average weight of 18.72 ± 3.33 g and 12 ± 0.05 cm long. Two concrete pipettes with the following dimensions 12 m^3 (12.000 liters), (4.20 m, x 3.10 m, x 1.20 m) were used. The duration of this trial was 75 days. The results showed significant discrepancies in, dissolved oxygen, electric conductivity, total dissolved solids, ammonia, ammonium, nitrite, nitrate, and phosphates ($p < 0.05$; $p < 0.001$). However, the pH and temperature did not show any significant differences ($p > 0.05$). The removal values of the ammonia and nitrite show that the SRW reduced 18% ammonia concentration and a 7% nitrite. The SRW shows relevant differences in the behavior variables compared to the traditional system in aspects such as latency to go over the first zone, number of transitions, and the time of permanence on the superior part of the tank ($p < 0.001$). The SRW did not affect the stress nor the animal's health variables ($p > 0.05$). However, the productive development variables showed a heavier weight, weight gain, and a specific growth rate in the SRW ($p = 0.005$). The SRW significantly saved 450 m^3 of water ($p < 0.001$). The SRW could be an effective alternative to fish production in zones where access to water is limited.

Key words: Behavior, productive development, stress, SRW, health.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de alimentos y el encarecimiento de la canasta básica a nivel nacional y la búsqueda de soluciones para producir alimento, lleva a los pequeños productores incursionar en rubros no tradicionales como la acuicultura.

El sistema mundial enfrenta numerosos desafíos, por ejemplo, el hambre, la malnutrición, las enfermedades relacionadas con la alimentación, la cada vez mayor población mundial que necesita alimentos en cantidades suficientes y saludables; la pérdida y el desperdicio de alimentos; el agotamiento de los recursos naturales y el cambio climático, así como las repercusiones de la pandemia de la enfermedad por coronavirus (COVID-19) (FAO, 2022).

La cría de especies de animales acuáticos al igual que plantas, son alimentos fundamentales, esenciales e indispensables que las personas de todo el mundo consumen. Son una parte importante de una dieta saludable, además de contar con un fuerte patrimonio cultural y una tradición culinaria. Además, una gran parte de estos viene de pescadores artesanales y piscicultores en pequeña escala (FAO, 2022).

En este caso la cría de la tilapia *Oreochromis niloticus*, originaria del continente africano que actualmente ha ganado aceptación en prácticamente todas las regiones del planeta apropiadas para su cultivo. Su resistencia a enfermedades, su fácil reproducción y su alta adaptabilidad a diferentes ambientes, alimentos y calidades de agua lo han hecho una de las especies más populares en la acuicultura de los países en vías de desarrollo. Los sistemas empleados para su cultivo van desde los más rudimentarios extensivos hasta las granjas tecnificadas intensivos y superintensivos (Villasante *et al.*, 2010).

El desarrollo de las tecnologías en la acuicultura avanza a pasos agigantados, y en el caso de la producción de tilapia *O. niloticus*, en el mercado internacional, ya que se mantiene dentro de los rangos de exigencias para las exportaciones principalmente a los Estados Unidos de América. La tilapia del Nilo, se caracteriza por ser una de las

especies con más rápido crecimiento, esta puede alcanzar pesos de 1 a 1.5 libras en un período de 6 a 9 meses, según el sistema de cultivo empleado (Velazco et al., 2016), de igual manera es una de las especies con una alta resistencia ya que se caracteriza por mostrar mayor sobrevivencia y por lo tanto mayor rentabilidad al no invertirse en medicamentos contra enfermedades (Saavedra, 2006).

La falta de espacio para la expansión y nuevos sitios (debido a la competencia con otros usos e intereses), la disponibilidad limitada de agua dulce y las preocupaciones sobre la contaminación se consideran obstáculos clave para una mayor expansión de la acuicultura convencional basada en jaulas y de flujo continuo (Ahmed & Turchini, 2021).

De acuerdo a datos de recolectados de la AUNAP (2014), la acuicultura ha incrementado la aplicación de nuevas tecnologías para mejorar la reproducción, crianza y engorde de peces mayoritariamente de consumo humano en ambientes naturales o artificiales (estanques o acuarios) y bajo el control de los parámetros fisicoquímicos de agua requeridos por cada especie.

No obstante, las instalaciones donde se cultivan peces, ya sea *O. niloticus*, u otra especie tienen cada vez mayores exigencias debido al aumento de la biomasa y a la necesidad de tener un adecuado control de la calidad del agua; convirtiéndose este último, en una variable crítica al momento de realizar el cultivo de peces a gran escala.

Según Krause et al., (2006), la acuicultura a lo largo de las últimas décadas se ha modificado y ha implementado diferentes formas de cultivo, que van desde sistemas extensivos, y de subsistencia hasta sistemas súper intensivos de altas densidades de siembra y altos estándares de producción. La mayor parte de la acuicultura de peces y crustáceos se lleva a cabo en estanques, los cuales requiere grandes extensiones de tierra y una significativa cantidad de agua limpia, y también grandes tanques (concreto u otros materiales) con flujo continuo de agua.

En el caso de los tanques de flujo continuo, éstos requieren menos extensiones de tierra, pero necesitan más agua por kilogramo de pescado producido para mantener

las buenas condiciones de crecimiento dentro del tanque, lo que conlleva a un consumo significativo de agua.

Kumar *et al.*, (2010), plantea, debido a la creciente demanda, la producción de la acuicultura impulsa a esta industria hacia prácticas más intensivas, debido a las limitaciones en la calidad y cantidad de agua, la disponibilidad y el costo de la tierra, las limitaciones en la descarga de agua y los impactos ambientales.

El Sistema de Recirculación de Agua (RAS, por sus siglas en inglés), es una de las tecnologías de acuicultura más reconocidas y altamente implementada en países como Japón, Estados Unidos, Israel, entre otros.

Esta tecnología consiste en recircular agua a través de una red de distribución y un sistema de filtración adecuado. Entre sus principales ventajas destacan el mantenimiento de los parámetros de calidad del agua, disminución del impacto ambiental, mejora del comportamiento de las especies, conservando en todo momento la calidad del cultivo (Ministerio de Agricultura, 2017).

Se ha demostrado que la producción de pescado en sistemas acuícolas de recirculación está incrementando constantemente desde hace décadas debido al aumento de los costos del agua de reposición, la descarga de aguas residuales, el control de la temperatura y la separación de los flujos de desechos (Blancheton *et al.*, 2007).

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Tipos de Sistemas de Cultivos

2.1.1. Generalidades del Sistema Tradicional o Flujo Continuo

Los sistemas abiertos tradicionalmente conocidos como sistemas de flujo continuo son aquellos que ingresan el agua al sistema de producción y la descargan al medio de forma continua y sin tratamiento. Estos dependen de la calidad del agua del medio natural.

Regularmente los flujos continuos dependerán de una buena fuente de agua, rica en oxígeno, excelente calidad química, esta debe ser permanente durante todo el año, que pueda fluir hacia las unidades de producción. Estas fuentes de agua pueden ser de ríos, quebradas, manantiales naturales, ojos de agua. En todos los casos esta debe estar libre de contaminante (agroquímicos) y principalmente con la temperatura adecuada para las diversas especies que se vayan a cultivar (Ríos, 2012).

Ríos (2012), señala que la densidad de siembra es un poco mayor, de 8 a 10 peces por m², donde se utilizan concentrado para los peces y los recambios de agua son mayores de al menos 50% por día. Normalmente son desarrollados en piletas de concretos, estanques de tierra y jaulas de bajo volumen.

Otra de las características que poseen los sistemas de flujo continuo es que la mayoría son empleados básicamente con fines comerciales y para esto se necesitan estanques técnicamente contruidos con entrada y salida de agua. Las cosechas y las siembras se llevan a cabo periódicamente, obedeciendo a una programación de la producción. En este tipo de piscicultura se realiza un control permanente de la calidad del agua y se practican abonamientos frecuentes con estiércol de animales o fertilizantes químicos. Se suministra alimento concentrado con niveles mayores de proteína en forma permanente y se programa la densidad de siembra, la cual varía de acuerdo a la especie y el grado de explotación. Se aplica una mayor tecnología cuya base está dada por los recambios continuos de agua y/o aireación (Sánchez, 2011).

2.1.2. Generalidades De los Sistemas Recirculación de Agua (RAS)

Los sistemas de recirculación de agua, se desarrollaron como una tecnología para la acuicultura intensiva, que se utiliza principalmente cuando la disponibilidad de agua está restringida, permitiendo que se recicle la mayor parte del agua. Permiten al operador un mayor control sobre los parámetros de calidad del agua, permitiendo las condiciones óptimas para el cultivo de peces (Badiola *et al.*, 2012).

Los RAS, no son sistemas simples, son métodos donde interaccionan tecnología y biología, ellos requieren de la supervisión constante de su rendimiento. Al transcurrir los años se han beneficiado del desarrollo continuo, desde los sistemas más simples de tratamiento de agua hasta los que incluyen procesos más sofisticados, hoy en día se consideran métodos de “alta tecnología” (Badiola, 2018).

Sánchez (2012), plantea que la calidad del agua es importante en la acuicultura para optimizar las condiciones fisicoquímicas para las especies cultivadas, y minimizar los efectos ambientales producidos por las heces, orina y aguas residuales.

Por lo general, los RAS constan de componentes de filtración mecánica y biológica, bombas y tanques de retención, además pueden incluir una serie de elementos adicionales de tratamiento que mejoren la calidad del agua y proporcionen control sobre las enfermedades dentro del sistema.

Los sistemas RAS, se caracterizan por utilizar un 90% menos de agua (o incluso menos) en comparación con los sistemas de cultivo de organismos de flujo continuo, además, hacen posible el control de las variables ambientales que afectan la fisiología de los organismos cultivados.

Estas variables pueden ser la temperatura, la turbiedad del agua, la salinidad, la concentración de nitrógeno amoniacal total (NAT), los nitritos (NO₂), los nitratos (NO₃), la luz, el oxígeno (O₂), la alcalinidad, los fosfatos, los sólidos (disueltos, suspendidos y sedimentables), y los metales pesados (Timmons *et al.*, 2002).

Algunas ventajas de los RAS son:

- ✓ Ahorro de agua.
- ✓ Permiten el cultivo de organismos en altas densidades.
- ✓ Se pueden desarrollar en lugares con limitaciones de agua o espacio.
- ✓ Minimizan el volumen del efluentes y desechos al medio.
- ✓ Permiten incrementar el control de las variables ambientales.
- ✓ Son ambientalmente sustentable.

2.1.3. Origen de los Sistemas RAS

De acuerdo a datos recolectados de Agrotendencia (2010), señala que las primeras investigaciones científica sobre los sistemas de recirculación, fueron realizadas en Japón en la década de 1950. Esta, se centró en el diseño de biofiltros para la producción de carpas, debido a la necesidad de utilizar de una manera más productiva los recursos hídricos limitados a nivel local. Igualmente, en Europa y Estados Unidos los científicos intentaron adaptar la tecnología desarrollada para el tratamiento de aguas residuales domésticas; a partir de lodos activados, biofiltros sumergidos y varios sistemas de filtración mecánica en el cultivo de peces y crustáceos.

Sin embargo, la mayoría de los estudios se centraron exclusivamente en la oxidación de los desechos tóxicos del nitrógeno inorgánico derivado del metabolismo de las proteínas; por esto, se excluyeron otros problemas importantes en el manejo de los residuos y se avanzó poco.

2.2 Componentes de un RAS.

Según Timmons *et al.*, (2002), señala que un sistema de recirculación sofisticado y de alta producción debe poseer cinco procesos o características:

- Remoción de sólidos.
- Biofiltración.
- Aireación u oxigenación.
- Desgasificación.

➤ Circulación del agua.

2.2.1 Remoción de Sólidos: Los desechos sólidos lo constituyen el alimento no ingerido, las partículas finas de alimento, las heces, las algas o películas bacterianas desprendidas de los biofiltros que se acumulan en los sistemas acuícolas. Un mal manejo de este componente puede afectar la salud de los peces involucrando problemas branquiales y aumentando la exposición a patógenos. Los sólidos se dividen en tres clases, sedimentables, suspendidos y finos (Akifumi, 2002).

a) Los sólidos sedimentables: Involucran las (partículas > micra o de 0,1 mm), son generalmente los más fáciles de remover y deben ser eliminados en el tanque de cultivo con la mayor rapidez como sea posible. Esto se logra fácilmente dando pendiente suave a un desagüe central, con un modelo de flujo circular o efecto de taza de té.

Otra alternativa externa, al tanque de cultivo, es usar un componente que se conoce como hidrociclón o remolino de separación. En este diseño los sólidos del agua y las partículas entran al separador de manera tangencial, la creación de un flujo circular o remolino patrón en un tanque de forma cónica (Galli & Sal, 2007).

b) Los sólidos Suspendidos: Son aquellas (partículas entre 40 y 100 micras), la diferencia entre sólidos suspendidos y sólidos sedimentables es fácil de identificar, los sólidos suspendidos no están dentro de la columna de agua mientras que los sedimentables sí. Para remover estos tipos de sólidos se usa la filtración mecánica que incluye la filtración por pantalla y los filtros de medio granular expandible, (Bautista & Ruiz, 2011).

c) Los sólidos finos: Son partículas en suspensión (partículas < a 40 micras) y se acumulan dentro del cultivo intensivo y no pueden ser removidos por los sistemas anteriormente mencionados. Galli & Sal (2007), recomiendan para remover los sólidos finos, utilizar el fraccionador de espuma o Skimmer (siglas en inglés), es un proceso a base de espuma de proteínas, se emplea a menudo para eliminar y controlar la acumulación de estos sólidos.

2.2.2 Biofiltración: Controla los compuestos nitrogenados producto del metabolismo de los organismos. La nitrificación tiene la función de controlar el nitrógeno amoniacal total (NAT) el cual debe ser removido del sistema a una tasa igual a la que es producido para mantener niveles seguros para el crecimiento de los organismos (Losordo *et al.*, 2009).

La nitrificación es un proceso aeróbico que se lleva a cabo en dos partes, la primera, en la cual el amonio es oxidado a nitrito mediante la acción de bacterias del género *Nitrosomonas*. La segunda parte consiste en la oxidación de nitrito a nitrato, realizado por bacterias del género *Nitrobacter*. Dentro de los mecanismos de remoción de compuestos nitrogenados tenemos los siguientes: contactor biológico rotatorio (RBC), filtros de medio expandible, filtros de cama fluidizado, filtros de torre empacada. El diseño del biofiltro es básico en un sistema de recirculación, por ello es indispensable saber diseñarlo haciendo un buen balance de masas determinando el flujo óptimo (Gutiérrez & Malone, 2006).

2.2.3 Aireación u Oxigenación: Es el primer factor limitante en la calidad de agua en acuicultura. El mantenimiento del oxígeno disuelto (OD) en concentraciones superiores 6 mg/L contribuye a reducir el estrés en la mayoría de las especies cultivadas y mejorar las tasas de crecimiento (Kubitza, 2006).

El sistema de aireación u oxigenación está compuesto por sopladores de aire y difusores, aireadores mecánicos de diversos tipos (aireadores de paso o bombas de agua), inyección directa de oxígeno y así mismo una combinación entre dos o más tipos de aireación (Kubitza, 2006).

2.2.4 Desgasificación: El dióxido de carbono (CO₂), un parámetro fundamental en la calidad de agua. El agua contiene (CO₂) de la respiración de los peces y de las bacterias en el biofiltro en altas concentraciones, pero el (N₂) en su forma libre también está presente (FAO,2015).

Antes de que el agua retorne a los tanques acumulan gases, lo cual afecta a los peces, por lo que tienen que ser removidos. Este proceso de desgasificación es realizado por la aireación del agua, y el método frecuentemente referido como “stripping” (siglas en

inglés) al proceso por el cual se elimina un componente gaseoso disuelto en un líquido (FAO, 2015).

2.0.6. **Dinámica de Desechos en un RAS**

En el caso de alimentos usados en sistemas de recirculación la (EPA, 2006) sostiene que la máxima prioridad en la formulación del alimento balanceado es la minimización de la excreción metabólica de nitrógeno que se produce a partir del catabolismo de aminoácidos para proporcionar energía metabólica, relacionada específicamente a la reducción de la excreción de nitrógeno en las heces resultante de la proteína no digerida.

Una de las fuentes de nitrógeno en los sistemas de producción para peces es los aminoácidos obtenidos de la digestión de proteínas. Una vez absorbidos estos aminoácidos pueden ser usados para construir nuevas proteínas o pueden ser desaminados y los residuos utilizados para formar otros compuestos (amonio, urea y ácido úrico) (Riaño, 2013).

Una gran parte (30-50%), de la dieta con la que se alimenta a los peces es proteína. La proteína se compone de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. Cuando la proteína es digerida por los peces, se excreta urea y amonio como nitrógeno, que también se conoce como nitrógeno amoniacal total (NAT). La porción no ionizada de NAT es el amoniaco (NH_3) es extremadamente tóxico para los peces. La cantidad de la forma no ionizada de NAT depende en gran medida del pH y temperatura, a un pH de 7.0, menos del uno por ciento del NAT está en su forma más tóxica (Krause *et al.*, 2006).

Del mismo modo la temperatura juega un rol fundamental en la excreción de nitrógeno amoniacal ya que la mayoría de los peces incrementan la excreción de NAT al aumentar la temperatura dentro del medio de cultivo, lo que resulta en la elevación de las demandas metabólicas. Esto ocurre porque al incrementarse la temperatura aumenta la velocidad de los procesos de desaminación de los aminoácidos provenientes de las proteínas de las dietas (Martínez, 2012).

2.3 Estructuras para el Tratamiento Mecánico

Las elevadas densidades de siembra en los RAS, requieren de altas dosis de alimentos, lo que conlleva a un alto nivel de producción de residuos (es decir, las heces y el alimento no consumido). La degradación biológica de estos residuos (materia orgánica en descomposición), producida por microorganismos como bacterias heterótrofas, consumen significativas cantidades de oxígeno, llamándole demanda biológica de oxígeno (DBO). Esta degradación biológica se produce en todas las superficies del sistema como los tanques, tuberías, filtros y partículas sólidas y en toda la columna de agua (Hutchinson *et al.*, 2004).

La ausencia de filtración mecánica adecuada, promueve la presencia de altos niveles de sólidos dentro de los sistema de recirculación, incrementando el crecimiento de la población de microorganismos que degradan la materia orgánica disponible debido a la disponibilidad de alimentos, convirtiéndose en usuarios importantes del oxígeno disuelto dentro del sistema, aumentando significativamente el suministro de oxígeno necesario para sostener altos niveles de crecimiento en los peces y la eficiencia necesaria del biofiltro (Hutchinson *et al.*, 2004).

2.3.1 Filtración Biológica

Uno de los puntos clave en el diseño de un sistema RAS es la filtración biológica mediante el uso de filtros biológicos. Se componen de un bio-reactor o tanque que contiene sustratos de diferentes materiales, diseñado para tener la máxima superficie de contacto con el fin de promover el crecimiento de la comunidad bacteriana a través de la producción de una bio-película (Avnimelech *et al.*, 2006).

Por otro lado, podemos llamarle filtro biológico al sustrato y a la colonia bacteriana que prolifera en él; estas bacterias transforman el (NAT) en nitritos y finalmente en nitratos. Cuando el sustrato es usado por primera vez es necesario realizar el proceso de ciclado, que consiste en inocular bacterias en el sustrato y esperar a su proliferación o maduración (Monti, 2015).

Comercialmente existe diversos tipos de sustratos para la filtración biológica, entre los que se encuentran: medio kaldnes, microesferas, canutillos, plásticos corrugados, biobolas, biobarriles, lechos fluidizados, sustratos ultraporosos; entre otros.

La capacidad de nitrificación de un biofiltro se debe al biofilm o bio-película que se forma en él. El biofilm se describe a menudo en términos de una estructura en capas, con una capa interior formada por una biomasa inerte que se adhiere sobre la superficie de los medios de fijación, herméticamente superpuesta por una rica población de bacterias nitrificantes y bacterias heterótrofas que dominan la capa exterior (Zhang & Ohashi, 2006).

Existen diferentes medios de fijación para los biofiltros, estos pueden ser de grava y arena, bolas de plástico, tubos de plástico, tubería de PVC (Malone & Pfeiffer, 2006).

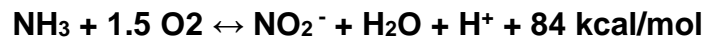
El nitrato es el producto final del proceso de nitrificación y de las diferentes formas de nitrógeno inorgánico, es considerado el menos tóxico para los peces, sin embargo, en altas concentraciones puede ser perjudicial, por lo que los niveles de nitrato en general son controlados por recambios de agua (Singer & Kessel, 2012).

Para la biofiltración, es necesario proporcionar un “medio de fijación” con una gran área de superficie, donde las bacterias nitrificantes puedan unirse y multiplicarse. Bacterias del género *Nitrosomonas* utilizan el (NAT) para crecer y multiplicarse, convirtiendo el NAT en nitrógeno en forma de nitrito ($\text{NO}_2\text{-N}$) (Krause *et al.*, 2005).

El primer paso del proceso de nitrificación es la oxidación de amonio. Para completar este proceso, el amonio se convierte en hidroxilamina por la enzima amonio monooxigenasa. Esto es seguido por la conversión de hidroxilamina a nitrito por la enzima hidroxilamina oxidoreductasa. Este primer paso se lleva a cabo por bacterias quimioautotróficas oxidantes de amonio.

Los géneros dominantes de bacterias oxidantes de amonio incluyen: *Nitrosomonas*, *Nitrosospira* y *Nitrosococcus* (Hovanec *et al.*, 2009). Seguidamente observaremos la ecuación combinando los dos pasos individuales dentro del proceso de oxidación de

amonio, en el que se produce de hidroxilamina y después es consumida (Cheatham, 2009).



Otro de los aspectos fundamentales del proceso de nitrificación es la oxidación de nitrito, que se lleva a cabo por la enzima nitrito oxidasa. Los géneros principales de bacterias oxidantes de nitrito incluyen al *Nitrobacter*, la *Nitrospira*, y el *Nitrococcus*. Al igual que sus contrapartes oxidantes de amonio, la mayoría de las bacterias responsables de la oxidación de nitrito son también quimioautótrofas gram-negativas aerobias, para producir biomasa utilizan una fuente inorgánica de electrones y carbono inorgánico. La reacción mediante la cual se convierte el nitrito a nitrato libera 17,8 kcal / mol, aproximadamente sólo ¼ de la energía liberada por la oxidación de amonio (Cheatham, 2009).



Cheatham (2009), plantea que algunas de las bacterias oxidantes de nitrito son capaces de usar fuentes de carbono orgánicas, la mayoría de las bacterias nitrificantes son autótrofas. Esto significa, que requieren para sobrevivir y crecer, una fuente de carbono inorgánico, tal como el dióxido de carbono. El carbono inorgánico se fija y se utiliza para generar masa celular (biomasa) a través del ciclo de Calvin.

Sandu *et al.*, (2002), describe tres tipos diferentes de biofiltros:

- ✓ Los biofiltros sumergidos: Estos presentan un medio de fijación sumergido constantemente bajo el agua. Los medios de fijación utilizados en este tipo de biofiltro incluyen grava, conchas de ostras, perlas de plástico sólido, anillos plásticos extruidos, entre otros.
- ✓ Los filtros percoladores: El diseño de filtros percoladores es similar a la de los filtros sumergidos, excepto que el agua residual fluye hacia abajo por sobre el medio y mantiene la película bacteriana mojada, pero nunca completamente sumergida.

- ✓ Disco rotatorio: En este sistema, el sustrato para las bacterias nitrificantes se compone de una serie de placas circulares paralelas, que están montados en un eje con un pequeño espacio entre ellos. Los discos están parcialmente sumergidos y giran sobre el eje, utilizando un motor de engranaje de baja velocidad o una rueda de paletas accionada por el flujo de agua.

2.4 Calidad de Agua

La supervivencia, el manejo y el correcto crecimiento de los organismos acuáticos depende principalmente de la calidad del agua. En acuicultura los parámetros que tienen mayor importancia en el cultivo de tilapias son: temperatura, pH, concentración de amonio, nitritos, nitratos, CO₂, O₂; entre otros. Cabe señalar que los rangos de tolerancia a los parámetros anteriormente mencionados varían según la especie (Feest, 2018).

Kubitza, (2006), plantea, el término calidad del agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria.

Datos obtenidos de la AUNAP (2014), señala que en los RAS el manejo de la calidad del agua es fundamental, ya que se trata de un sistema cerrado, donde el recambio de agua es mínimo y las deposiciones son constantemente acumuladas; por lo tanto, si los procesos de tratamientos de agua no son controlados de forma adecuada, pueden ocasionar un deterioro en la calidad del agua, provocando el crecimiento inadecuado de los peces, aumento del estrés, riesgo de enfermedades y en consecuencia pérdidas en el proceso productivo.

En los RAS la calidad de agua está referida a los parámetros críticos relacionados a las necesidades del pez en cultivo, pero también, es necesario tener en cuenta el impacto que la calidad de agua pueda tener sobre los biofiltros (Colt, 2006).

Cristea *et al.*, (2010), señala, que en un sistema RAS la calidad del agua se determina, principalmente por la concentración de oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal no ionizado, el nitrito y el CO₂. Los niveles de concentración de nitratos, pH y alcalinidad del agua constituyen también parámetros importantes de la calidad del agua.

2.5. Parámetros de Calidad de Agua

2.5.1 Oxígeno

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros más importantes que determinan la calidad del agua en un sistema de recirculación, es el limitante para la capacidad de carga y la densidad de siembra dentro de los RAS, de manera que es necesario mantener una alta concentración de oxígeno disuelto para la buena salud de los organismos cultivados y el buen funcionamiento del biofiltro relacionado al mantenimiento de bacterias aeróbicas (Watson & Hill, 2006).

Merino (2011), sostiene que las únicas fuentes de ingreso de OD, en un sistema de recirculación de agua, lo constituyen el que ingresa con el caudal de agua y aquel ingresado por sistemas de tratamiento de gases. Cabe mencionar que la concentración de oxígeno es más alta a bajas temperaturas y más baja a altas temperaturas, condición que, según Timmons, (2006) es exactamente contraria a lo que los peces necesitan para su metabolismo basal y conversión de alimento.

2.5.2. Amonio

El Amoníaco en el agua existe en dos formas, como iones de Amoníaco (NH₄⁺), los cuales no son tóxicos, y como Amoníaco tóxico no ionizado (NH₃⁻). La proporción relativa de uno o el otro depende de la temperatura del agua, el pH y la salinidad (Chen *et al.*, 2006).

La toxicidad del amonio aumenta al incrementar el pH, debido a que en aguas básicas la posibilidad de excretar el amoniaco se ve limitada, por la escasez de concentración de protones (H^+), por lo tanto, se produce una intoxicación por esta sustancia, caso contrario ocurre en agua ácidas, donde hay mayor prevalencia de amonio ionizado (NH_4^+) (Carvajal, 2014).

2.5.3. Nitrito

Kroupova *et al.*, (2015), señala que el nitrito es tóxico para los peces alterando múltiples funciones fisiológicas incluyendo la regulación iónica, respiratoria, cardiovascular, endocrina y procesos excretores. Una consecuencia de la acumulación crítica de nitrito es la oxidación de la hemoglobina en metahemoglobina, comprometiendo el transporte de oxígeno en la sangre.

La toxicidad del nitrito para los peces varía considerablemente y depende de un gran número de factores externos e internos. Entre las más importantes tenemos: la calidad del agua (pH, temperatura, cationes, aniones, la concentración de oxígeno, entre otros), la duración de la exposición, la especie de pez, el tamaño, la edad y la susceptibilidad individual del pez (Timmons, 2002).

2.5.4. Nitrato

Sánchez (2011), sostiene que el nitrato es el producto final de la nitrificación y representa la forma menos tóxica del nitrógeno, algunas investigaciones han reportado efectos nocivos en ciertas especies producidas por altas concentraciones de este compuesto, esta situación es especialmente importante en el caso de organismos marinos debido a su acción inhibitoria de la osmorregulación de estos. Con base en lo anterior, es práctica común el control de los niveles de nitratos en RAS por medio del recambio diario de un cierto porcentaje del agua del sistema, del orden del 5 al 10%.

2.5.5. pH

En un sentido práctico, el pH del agua puede variar de 0 a 14 y está relacionado con la concentración de ion hidrógeno (un ácido fuerte) en el agua del estanque. El agua

del estanque puede ser ácida ($\text{pH} < 7,0$), neutral ($\text{pH} = 7,0$) o alcalina ($\text{pH} > 7,0$). En general, los peces y los camarones cultivados presentan mejores resultados de producción y salud a niveles de pH de agua que oscilan entre 7,5 y 8,5, ya que estos valores coinciden con el pH de su sangre y hemolinfa (Kubitza, 2017).

2.5.6. Temperatura

Según Victoriano *et al.*, (2012), este es uno de los parámetros fisicoquímicos determinante para el crecimiento de peces en sistemas intensivos, ya que a muy bajas temperaturas afecta significativamente la tasa de crecimiento.

Martínez (2002), sostiene que la temperatura realiza cambios sobre el metabolismo de los peces, la cual incrementa los costos de mantenimiento de las funciones corporales, acelera el crecimiento y aumenta las demandas energéticas asociadas con la actividad del pez, además repercute en una mayor excreción de amonio. A temperaturas óptimas los peces crecen rápidamente, convierten el alimento de manera eficiente, y son relativamente resistentes a muchas enfermedades. De igual forma, la eficiencia del biofiltro también se ve afectada por la temperatura, pero no es generalmente un problema en los sistemas de aguas cálidas.

2.5.7. Dureza

Es la medida de la concentración de los iones de calcio y magnesio expresadas en partes por millón (ppm) de su equivalente a carbonato de calcio (CaCO_3). Existen aguas blandas (<100 ppm CaCO_3) y aguas duras (>100 ppm CaCO_3). Alcalinidades superiores a los 175 ppm CaCO_3 resultan perjudiciales, ya que se producen formaciones calcáreas, que pueden dañar las branquias de los peces. Durezas por debajo de 20 ppm ocasionan problemas en el porcentaje de fecundidad (Bautista & Ruiz, 2011).

2.5.8. Salinidad

La salinidad se define como la concentración total de iones disueltos en el agua, y generalmente se expresa en partes por mil (‰ o ppt), gramos de sal por kilogramo de agua de mar. Cada una de las especies acuáticas tiene un rango óptimo de salinidad para su reproducción y crecimiento, aunque la tolerancia a la salinidad de la mayoría de especies acuícolas es bastante amplia (Timmons, 2002).

2.5.9 Total de solidos disueltos

Los TDS como comúnmente son llamados son la medida de la materia en una muestra de agua, más pequeñas de 2 micrones (2 millonésimas de un metro) y no pueden ser removidos por un filtro tradicional. TDS es básicamente es la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltas en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua. Los TDS, incluyen sales inorgánicas como:

- ✓ Carbonatos.
- ✓ Bicarbonatos.
- ✓ Cloruros.
- ✓ Sulfatos.
- ✓ Fosfatos.
- ✓ Nitratos de sodio.
- ✓ Potasio.
- ✓ Calcio.
- ✓ Magnesio.
- ✓ Hierro.

Además, incluyen la materia orgánica. Estos pueden clasificarse de acuerdo con su tamaño y estado (sólidos en suspensión, sólidos coloidales y sólidos disueltos), por las características químicas (sólidos volátiles y fijos) y por la decantabilidad (sólidos en suspensión sedimentables y no sedimentables) (Machado, 2012).

2.6. Biología y Morfología de la Tilapia Del Nilo (*O. Niloticus*).

2.6.1. Rasgos Biológicos (FAO, 2010) (Figura 1)

- Posee un cuerpo comprimido.
- Profundidad del pedúnculo caudal es igual a su longitud.
- Escamas cicloideas.
- Protuberancia ausente en la superficie dorsal del hocico.
- La longitud de la quijada superior no muestra dimorfismo sexual.
- El primer arco branquial tiene entre 27 y 33 filamentos branquiales.
- La línea lateral se interrumpe.
- Espinas rígidas y blandas continuas en aleta dorsal.
- Aleta dorsal con 16 ó 17 espinas y entre 11 y 15 rayos.
- La aleta anal tiene 3 espinas y 10 u 11 rayos.
- Aleta caudal trunca.
- Las aletas pectoral, dorsal y caudal adquieren una coloración rojiza en temporada de desove; aleta dorsal con numerosas líneas negras.

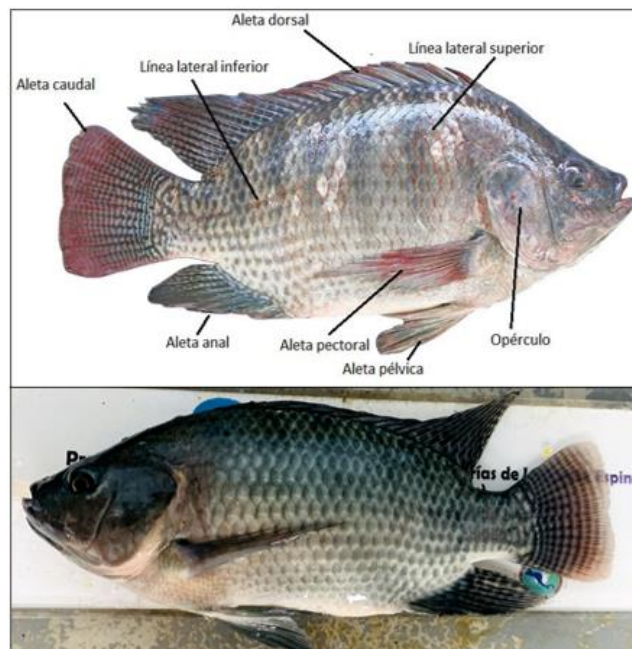


Figura 1. Rasgos Biológicos de la tilapia *O. Niloticus*. Fuente: FAO,2010.

2.6.2. Antecedentes

Baltazar & Palomino (2004), indica que la tilapia como, pez endémico originario de África y el Cercano Oriente, del cual se aprovechó sus características consideradas ideales para la piscicultura rural, iniciando su progresivo cultivo en el ámbito mundial. Estos peces han sido introducidos en forma acelerada hacia otros países tropicales y subtropicales en todo el mundo.

La institución SAGARPA (2006), define también a la tilapia como un grupo de peces de origen africano, que habitan principalmente en regiones tropicales del mundo, donde existen las condiciones necesarias para su reproducción y crecimiento. Agregando que, en comparación con otros peces, posee extraordinarias cualidades para el cultivo, como: crecimiento acelerado, tolerancia a altas densidades, adaptación a cautiverio, aceptación de una amplia gama de alimentos, alta resistencia a enfermedades, además de contar con algunos atributos para el mercado, como: carne blanca de buena calidad, buen sabor, poca espina, buena talla y precio accesible, que le que le confiere una preferencia y demanda comercial en la acuicultura mundial.

NICOVITA (2002), menciona que es un pez de buen sabor y crecimiento rápido, se puede cultivar en estanques y en jaulas, soporta altas densidades, resiste condiciones ambientales adversas, tolera bajas concentraciones de oxígeno y puede ser manipulado genéticamente.

En la actualidad a nivel mundial, se cultivan con éxito unas diez especies, siendo uno de los peces más ampliamente producidos en el mundo. Las especies más cultivadas son: *O. aureus*, *O. niloticus* y *O. mossambicus*, así como varios híbridos de éstas especie; siendo *O. aureus* y *O. niloticus*, las que crecen más rápido y alcanzan mayor tamaño que *O. mossambicus*; aunque requiriendo un mayor tamaño para su reproducción, además de tener un alto porcentaje de masa muscular, filete grande, ausencia de espinas intramusculares, crecimiento rápido, adaptabilidad al ambiente, resistencia a enfermedades, excelente textura y coloración de carne, con muy buena aceptación en el mercado.

2.6.3. Nutrición

Saavedra (2006), complementa que el género *Oreochromis* se clasifica como omnívoro, por presentar mayor diversidad en los alimentos que ingiere, variando desde vegetación macroscópica hasta algas unicelulares y bacterias, tendiendo hacia el consumo de zooplancton. Las tilapias son peces provistos de branqui-espinas con los cuales los peces pueden filtrar el agua para obtener su alimentación consistiendo en algas y otros organismos acuáticos microscópicos.

Baltazar & Palomino (2004), sostiene que la base de la alimentación de la tilapia para la producción y comercialización es la proteína. Estas son los nutrientes más importantes para la vida y el crecimiento del pez. Para la alimentación de los peces en su diferente estadio, se debe tener en cuenta el nivel de proteína con el que se obtiene el máximo crecimiento. Asimismo, a medida que avanza el cultivo, este nivel de proteína que produce máximo crecimiento disminuye con el incremento del peso del pez.

2.6.4 Producción

Datos obtenidos de El-SAYED, (2019) la tilapia es el tercer tipo especie de pez más producido en la acuicultura de todo el mundo. Actualmente, el principal productor de tilapia en el mundo es China con 1.7 millones de toneladas métricas (TM).

Los otros grandes productores de tilapia en el mundo son Indonesia y Egipto. Indonesia produce 1.1 millones de TM mientras que Egipto 900.000 de TM cada año. Se espera que para este último la producción aumente un 10% este año (Sáenz, 2021).

Por otro lado, el mayor importador de tilapia es Estados Unidos. Durante la segunda mitad del siglo XX la tilapia se extendió por todos los continentes para su producción (figura 2) (Tveteras, 2020).

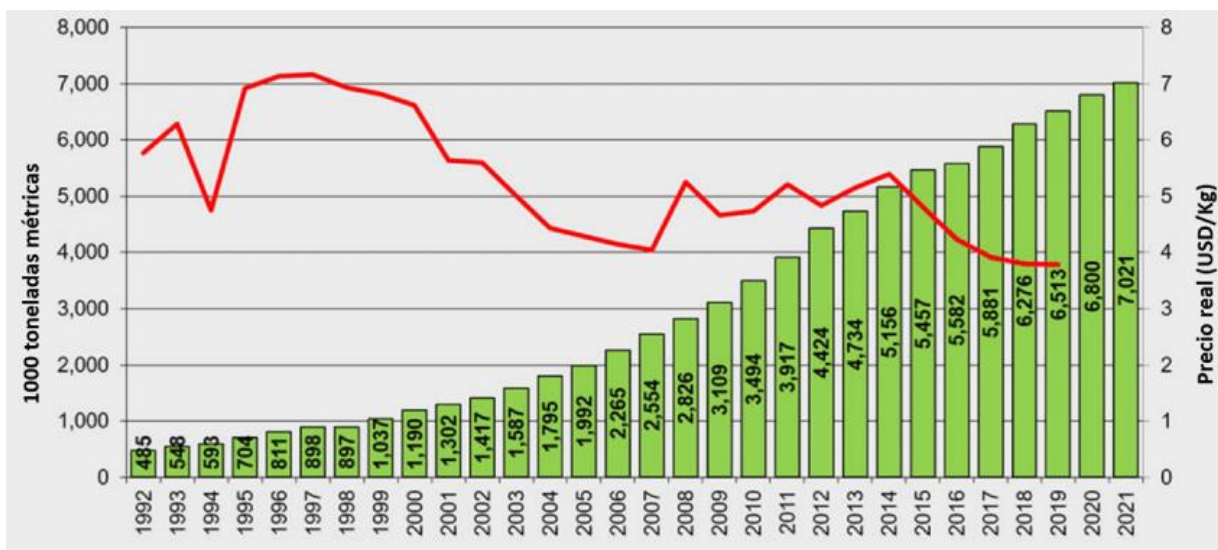


Figura 2. Producción mundial de la tilapia.
(Tveteras, 2020).

Fuente: Global Aquaculture Alliance

La producción de tilapia ha venido en aumento cada año. En 2010 hubo una producción de 2.657,7 millones de toneladas, mientras que en 2018 llegó a 4.525,4 millones de toneladas. La tilapia en 2018 representó un 8,3% de toda la producción mundial de especies acuícolas, situándose, así como la tercera de mayor producción (Sáenz, 2021).

2.7. OBJETIVOS

2.7.1. Objetivo General

- Comparar un sistema de recirculación de agua (RAS) y un sistema tradicional sobre el desempeño productivo de alevines de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*).

2.7.2. Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un RAS para alevines de tilapia del Nilo.
- Determinar variables fisicoquímicas del agua en un RAS y un sistema tradicional para alevines de tilapia del Nilo.
- Evaluar indicadores de estrés y bienestar animal en un RAS y un sistema tradicional para alevines de tilapia del Nilo.
- Comparar el desempeño productivo de alevines de tilapia del Nilo en un sistema de recirculación y un sistema tradicional.

2.8. Hipótesis

Ho: El RAS no tiene un efecto en el desempeño productivo de alevines de tilapia del Nilo.

Ha: El RAS tiene un efecto en el desempeño productivo de alevines de tilapia del Nilo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área Geográfica

El estudio se desarrolló en el distrito de Gualaca, provincia de Chiriquí, en la Estación Experimental Dulce Acuícola Ricardo Ríos, Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP). La altitud es de aproximadamente 100 m.s.n.m., en las coordenadas: N 52° 55' 13.79" W, N 60° 32' 53.35" E, con temperaturas que oscilan entre 30-35 °C y vientos de 56 Km/h (Figura 3).



Figura 3. Área geográfica, Estación Experimental Dulce Acuicola de Gualaca.

Fuente: Google Maps, 2022.

3.1.1. Abastecimiento de agua

Las unidades de producción (piletas de concreto, sala de peceras, estanques rústicos y reserva de agua) se abastecieron de agua por gravedad. El agua que abastece las instalaciones proviene de la Represa la Barrigona del Proyecto hidroeléctrico Estí a través de un canal artificial denominado Casa Blanca (Ríos, 2012).

3.2. Población

Para llevar a cabo este estudio se utilizaron alevines de tilapia *O. niloticus* machos, con 35 días después de su reversión. Estos alevines fueron adquiridos en la estación experimental Ricardo A. Ríos, Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP), ubicada en Gualaca, provincia de Chiriquí.

3.3. Periodo de Aclimatación

Los animales experimentales fueron extraídos de sus viveros y transportados a las unidades internas de las instalaciones de la ARAP, para someterse al proceso de aclimatación por un período de 15 días. Se alojaron en una pileta de concreto de 5.94 m³ (3.00 m x 1.80 m x 1.10 m, largo x ancho x altura) y fueron tratados con sal cruda (15 libras), durante 3 días para evitar infecciones de *Saprolegnia sp.* Los alevines recibieron una alimentación de 15% de su biomasa, con un concentrado con valores de proteína de 45%. La ración se suministró dos veces al día (07:00 am - 07:00 pm horas).

3.4. Parámetros Fisicoquímicos del agua

La unidad de aclimatación fue equipada por un sistema semi cerrado y un sistema auxiliar de oxigenación que es suministrado por un *sweetwater blower* (soplador de aire, *BALDOR RELIANCE®*). Semanalmente se recambió un 30% del volumen de agua. Diariamente se muestrearon las variables fisicoquímicas del agua con un multiparámetro YSI 556 (*HANNA®*), adicionalmente se tomaron muestras semanales de amoníaco, nitrito, nitrato y fosfato medidos con un fotómetro HI 83306 (*HANNA®*).

3.5. Periodo de Experimentación

El estudio comprendió un periodo experimental de 75 días. Iniciando el 9 de junio y finalizando el 16 de agosto de 2022.

3.6. Alojamiento

Después del período de aclimatación se seleccionaron al azar 300 peces por tratamiento con un peso promedio inicial de 18.72 ± 3.33 g y una longitud total de $12 \pm 0,05$ cm, fueron distribuidos en dos piletas de concreto de 12 m^3 (12,000 litros de volumen útil) con dimensiones de (4.20 m, x 3,10 m, x 1,20 m), ambas piletas estaban equipadas con un sistema de oxigenación similar al descrito en el periodo de aclimatación. Se alimentaron tres veces al día en un horario de (08:00 am - 12:00 pm y 05:00 pm) a una tasa de 5% de su peso vivo empleando un alimento comercial con 45% de proteína cruda.

3.7. Tratamientos

El estudio consistió de dos tratamientos: el sistema tradicional (TRA) y el sistema de recirculación de agua (RAS).

3.8. RAS

El abastecimiento de agua del RAS se realizó al inicio del ensayo, y se realizaron recambios de agua de aproximadamente el 10% del volumen una vez al mes. Los componentes del sistema para el proceso de filtración fueron un sedimentador y un biofiltro, para su construcción se utilizaron dos tanques cilíndricos de plástico de 55 galones con un volumen 208.20 litros cada uno. Se diseñó un sedimentador radial de plástico (Figura 4), en forma de cono, cuyo principal propósito fue atrapar los sólidos más pesados, al reducir la turbulencia y la velocidad de la corriente de aguas residuales (Tilley *et al.*, 2014), que cumple la misma función que un desarenador, pero está diseñado para remover partículas menos gruesas.

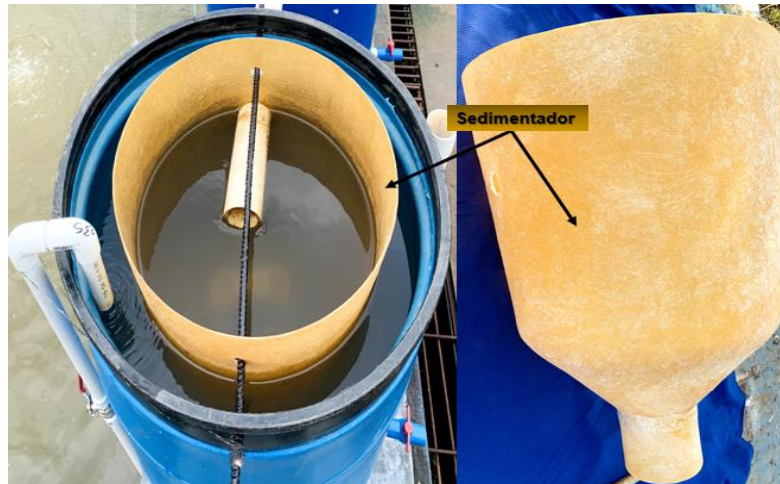


Figura 4. Diseño del sedimentador radial. Fuente: Castro,2022.

El sistema de biofiltración (Figura 5), se le incorporó sustratos de diferentes materiales, para tener la máxima superficie de contacto con el fin de promover el crecimiento de la comunidad bacteriana a través de la producción de una bio-película (Avnimelech *et al.*, 2006). En este caso los materiales que fueron incorporados dentro del interior del filtro biológico fueron: 20 pulgadas de piedra picada, malla corrugada, polifón, plásticos corrugados, y por último materiales flotantes como medio para la multiplicación de bacterias nitrificantes. Detallamos a través de un esquema el sistema de recirculación (figura 6 y 7). Adicionalmente el sistema tenía una bomba sumergible (*AQUASTRONG EKS-750 P®*) con una capacidad de 14 m³/h, sin embargo, en el experimento se reguló a una capacidad de 12 m³/h. La bomba se utilizó para recircular el agua desde la unidad experimental hacia el sedimentador.



Figura 5. Materiales para la filtración biológica. Fuente: Castro,2022.

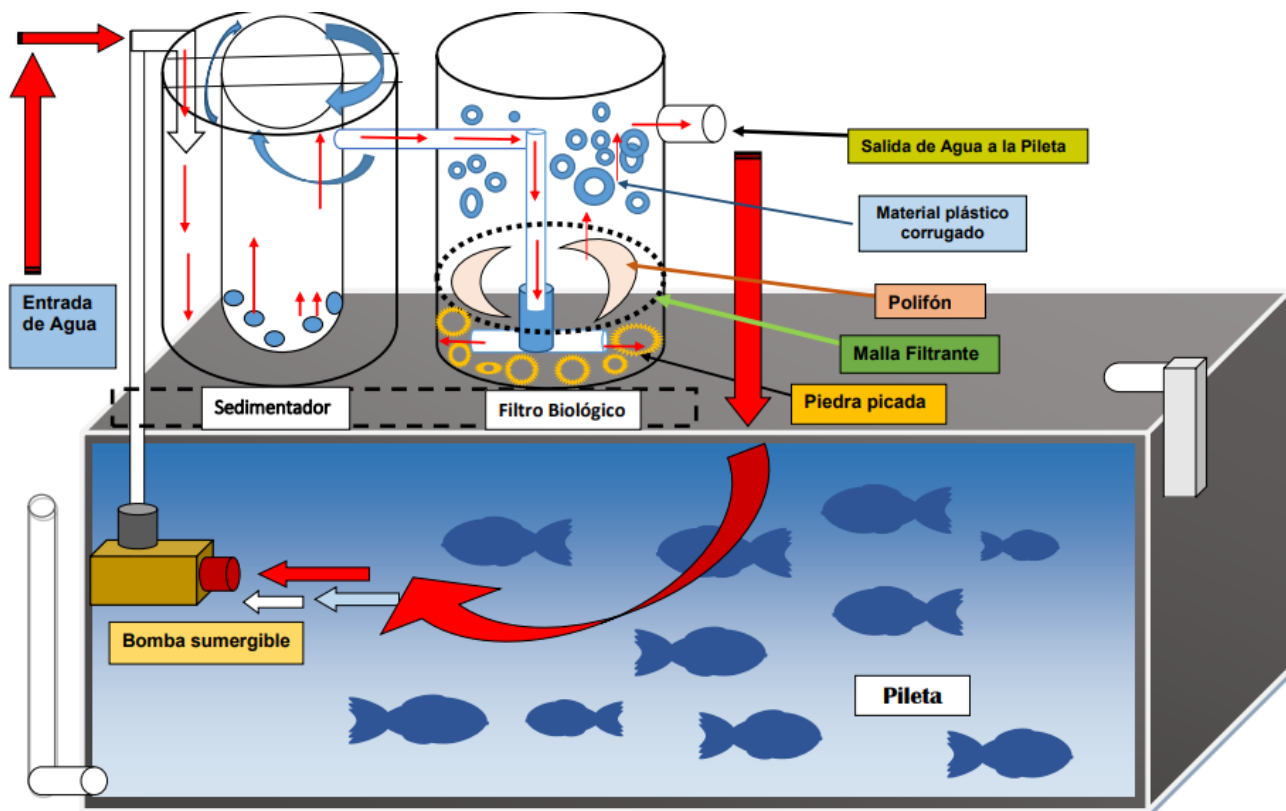


Figura 6. Esquema del sistema de recirculación de agua.

Fuente: Castro, 2022.

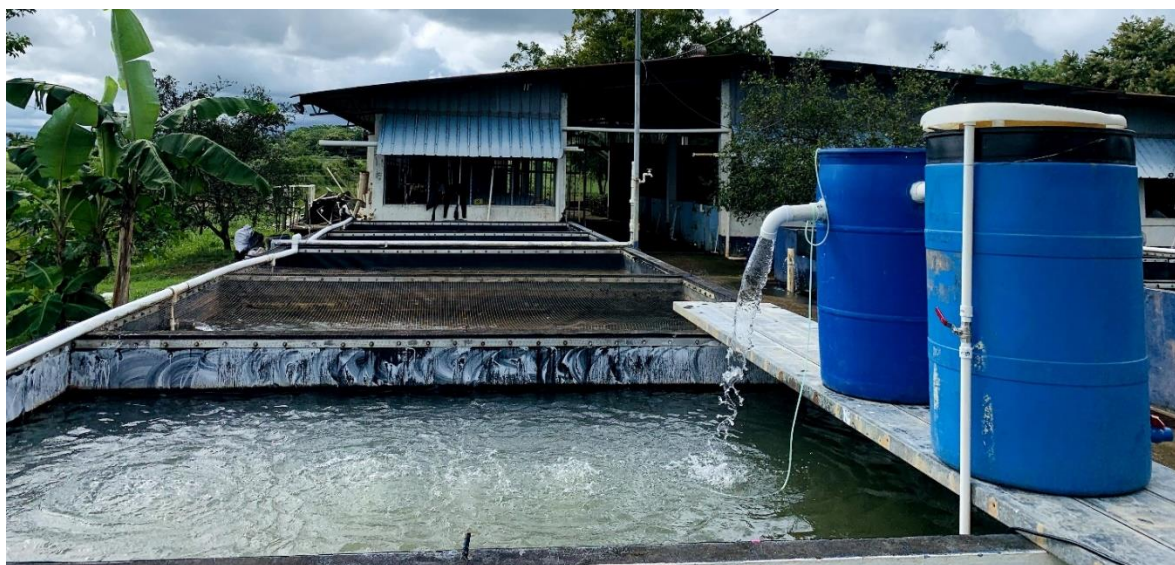


Figura 7. Imagen real del sistema de recirculación de agua.

Fuente: Castro, 2022.

3.9. Sistema tradicional

El sistema tradicional consistió en una entrada y salida de agua constantes (figura 8), se abasteció por gravedad con una tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro con un caudal de entrada de $680\text{m}^3/\text{h}$.



Figura 8. Sistema tradicional. Fuente: Castro,2022.

3.10. Variables evaluadas

3.10.1 Parámetros fisicoquímicos del agua

Las variables fisicoquímicas como: temperatura, oxígeno disuelto (OD), pH, conductividad y total de sólidos disueltos (TDS), fueron evaluadas diariamente en un horario de (07:00 am - 12:00 pm y 06:00 pm) utilizando un equipo multiparámetro YSI 556 (HANNA®).

Adicionalmente se determinó amoníaco NH_3 , amonio NH_4^+ , Nitrito NO_2^- , nitrato NO_3^- y fosfato PO_4^{3-} , empleando un fotómetro HI 83306 (HANNA®).

3.0.10.2. Indicadores de comportamiento

Para evaluar el comportamiento se utilizó la prueba de actividad semanalmente, tomando 10 peces al azar por tratamiento. Cada pez fue introducido en una pecera rectangular de vidrio (61 cm x 39 cm x 42 cm); 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 10 áreas de (10 x 10 cm) para seguir el movimiento horizontal del individuo. Adicionalmente se colocó una línea horizontal a 12 cm del fondo en la parte lateral de la pecera para seguir el comportamiento vertical del individuo. Se cuantificó la latencia para entrar a la primera zona (LPZ), tiempo de congelación (TC), número de transiciones (#TRAN) y el tiempo de permanencia en la parte superior del tanque (TPST), adaptando la metodología propuesta por Millot, (2009); & Overli *et al.*, (2006).

3.0.10.3. Indicadores de estrés

Se utilizó como indicador de estrés la tasa ventilatoria (VR) evaluando semanalmente, 10 peces al azar por tratamiento, contando visualmente el tiempo necesario para 20 movimientos operculares o bucales durante un minuto, un movimiento opercular es igual a un ciclo de apertura y cierre del opérculo o boca durante la respiración es decir movimiento completo de inhalación y exhalación, de acuerdo con la metodología propuesta por Calderer, (2001); Barreto & Volpato (2011).

3.0.10.4. Indicadores de bienestar animal

Se estimó semanalmente el grado de erosión de las aletas, realizando un conteo de las lesiones en las aletas pectoral, pélvica, dorsal, anal, caudal. Los valores obtenidos de las lesiones se sumaron para establecer el grado de lesión total por individuo. La erosión de las aletas se definió como un cambio en el área total de las aletas y se estimó mediante la comparación del perfil de las aletas con una aleta perfecta. Para evaluar el grado de erosión se empleó la escala adaptada de Person-Le Ruyet & Le Bayon (2009), en donde: nivel 0: aleta perfecta, 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%).

3.10.2. Indicadores de desempeño zootécnico

a. Peso (g)

Se evaluó el peso semanalmente, con una balanza eléctrica *OHAUS®* con capacidad de 1,5 kg con aproximación de 0,01 g. Adicionalmente se determinó:

b. Ganancia de peso (GP)

$$GP(g) = PF(g) - PI(g)$$

Donde: PF= peso final, PI= peso inicial.

c. Tasa de crecimiento específico (SGR)

$$SGR = (\ln PF - \ln PI) / \text{días} \times 100\%$$

Donde: $\ln PF$ = Logaritmo de peso final, $\ln PI$ = Logaritmo de peso inicial.

d. Longitud (cm)

Se determinó la longitud total semanalmente, de acuerdo con el criterio de Laevastu, (2011), 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.

3.11. Consumo de agua

Se evaluó el consumo de agua en metros cúbicos hora (m^3/h) durante el estudio.

3.12. Análisis estadístico

Todos los datos se ingresaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel® 2021 para su procesamiento y los análisis estadísticos se realizaron en el software R con el entorno de desarrollo integrado RStudio (R versión 4.0.4 (2021-02-15), RStudio, Inc.), Statistica versión 10 (StatSoftV10) y los gráficos mediante Graph Pad Prism V.9.0.0 (San Diego, CA, USA).

Las variables fisicoquímicas del agua, comportamiento y estrés fueron evaluadas por los supuestos de normalidad utilizando la prueba de Shapiro-Wilk's, y la prueba de Levene's para analizar la homogeneidad de varianzas.

La variable de bienestar animal fue analizada mediante Modelos Lineales Generalizados ajustados por la familia Poisson.

Las variables de desempeño zootécnico fueron evaluadas por Modelos Lineales Generales mediante análisis de covarianza utilizando el peso inicial como covariable.

La tasa de remoción de amoníaco, nitrito y el consumo de agua fueron analizados mediante la prueba de Chi Cuadrado. En todas las pruebas estadísticas se consideró una significancia del 5%.

IV.RESULTADOS

4.1. Parámetros fisicoquímicos del agua

4.1.1. Oxígeno disuelto

Los resultados muestran que existe diferencias significativas, en las concentraciones de oxígeno disuelto ($U= 14774.50$, $p= 0.01$) entre los tratamientos (Figura 9). Los meses de estudio mostraron una tendencia en la concentración de oxígeno ($K-W= 5.52$, $p= 0.06$). La interacción tratamiento por mes, mostró diferencias significativas ($K-W= 13.32$, $p= 0.02$). La prueba de comparaciones múltiples de Dunn's indica que no existe diferencias significativas entre los tratamientos por mes de estudio ($p > 0.05$).

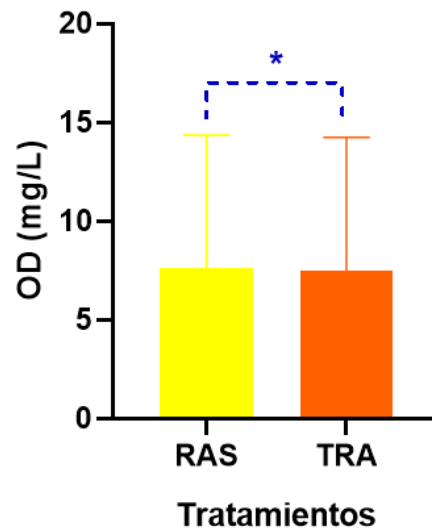


Figura 9. Media \pm D.E., de la concentración de OD en mg/L.* $p < 0.05$.

4.1.2. Conductividad eléctrica

La prueba U de Mann-Whitney indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en la conductividad eléctrica ($U= 9054,50$, $p= < 0,001$) (Figura 10 A). La prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas entre los meses de estudio ($K-W = 69,55$, $p= 0,01$). La prueba de comparaciones múltiples de Dunn's indica que existe diferencias significativas entre los meses, tres comparado con uno y dos ($p= < 0,001$; $p= < 0,001$, respectivamente), sin embargo, los meses uno y dos no mostraron diferencias significativas ($p= >0.05$) (Figura 10 B). La interacción tratamiento por mes, mostró diferencias significativas ($K-W= 134,22$, $p= 0,01$). La prueba de comparaciones múltiples de Dunn's indica que existe diferencias significativas entre tratamientos en el mes uno, dos y tres ($p < 0,001$, $p < 0,001$, $p=0,04$, respectivamente) (Figura 10 C).

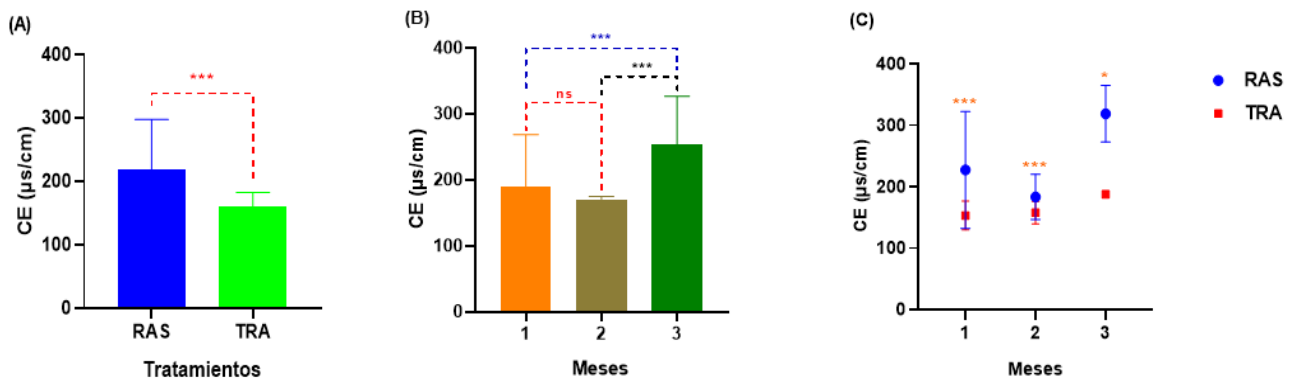


Figura 10. (A, B, C). Media \pm D.E., de conductividad eléctrica en $\mu\text{s/cm}$. A. tratamientos; B. meses; C. interacción tratamiento por mes. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns= no diferencias.

4.1.3. Total de sólidos disueltos

Los resultados muestran que existen diferencias significativas en los totales de sólidos disueltos ($U= 9684,50$, $p= <0,001$) entre el RAS y el sistema tradicional (Figura 11 A). La prueba de Kruskal-Wallis indica que existen diferencias significativas entre los meses de estudio ($K-W = 82,87$, $p= < 0,001$). La prueba de Dunn's mostró diferencias significativas entre todos los meses, uno comparado con dos, uno comparado con tres y dos comparado con tres ($p= 0,003$, $p= < 0,001$, $p= < 0,001$, respectivamente) (Figura 11 B). La interacción tratamiento por mes, mostró diferencias significativas ($K-W= 146,70$, $p= < 0,01$). La prueba de Dunn's mostró diferencias significativas entre los tratamientos en el mes uno, dos y tres ($p < 0,001$; $p < 0,04$; $p < 0,001$, respectivamente) (Figura 11 C).

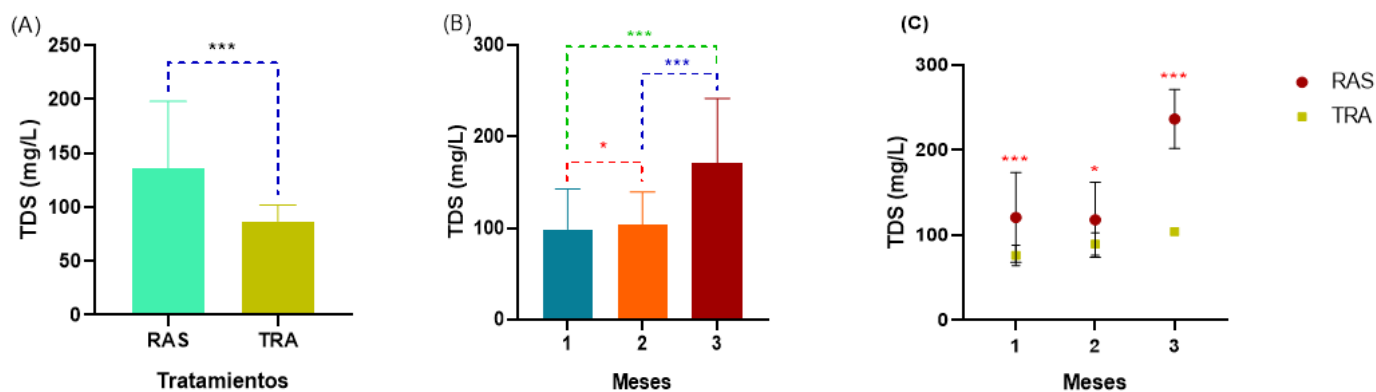


Figura 11. (A, B, C) Media \pm D.E., de TDS en mg/L. A. tratamientos; B. meses; C. interacción tratamiento por mes. ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

4.1.4. pH

La prueba U de Mann-Whitney mostró que no existen diferencias significativas entre los tratamientos en el pH ($U= 1727,00$, $p=0,98$). La prueba de Kruskal-Wallis indica que no existen diferencias significativas entre los meses de estudio ($K-W= 3,12$, $p= 0,20$). La interacción tratamiento por mes, mostró que no existe diferencias significativas en los valores de pH ($K-W= 7,35$, $p= 0,19$).

4.1.5. Temperatura

Entre los tratamientos la prueba U de Mann-Whitney indica que no existen diferencias significativas en la temperatura ($U=16809,00$, $p=0,63$). Entre los meses de estudio la prueba de Kruskal-Wallis indica que no existen diferencias significativas ($K-W= 1,17$, $p= 0,55$). La interacción tratamiento por mes, mostró que no existe diferencias significativas ($K-W= 1,43$, $p= 0,92$).

4.1.6. Amoníaco

La prueba U de Mann-Whitney indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en las concentraciones de amoníaco ($U =14,00$, $p = 0,007$) (Figura 12).

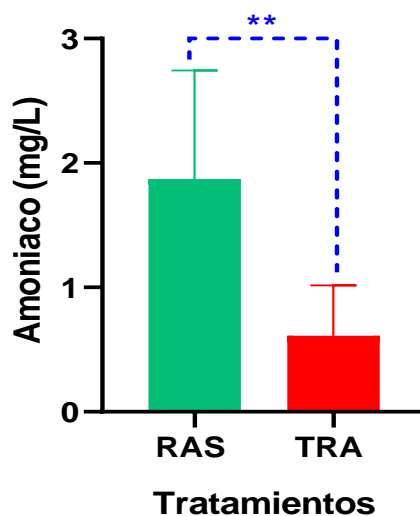


Figura 12. Media \pm D.E., de NH_3 en mg/L. $**p > 0,01$.

4.1.7. Amonia

La prueba U de Mann-Whitney indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en las concentraciones de amonio ($U= 13,00$, $p= 0,005$) (Figura 13).

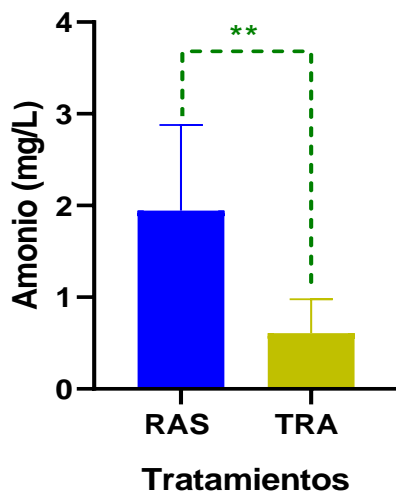


Figura 13. Media \pm D.E., de (NH_4^+) en mg/L. ** p 0,01.

4.1.8. Nitrito

Los resultados indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en las concentraciones de nitritos ($U= 12,50$, $p=0,005$) (Figura 14).

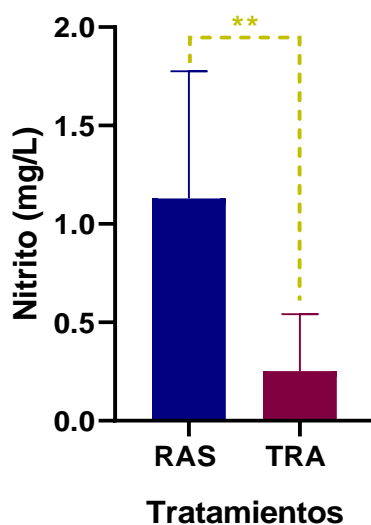


Figura 14. Media \pm D.E., de (NO_2^-) mg/L.** p 0,01.

4.1.9. Nitrato

La prueba U de Mann-Whitney mostró que existen diferencias significativas entre los tratamientos en las concentraciones de nitrato ($U=6,00$, $p= 0,001$) (Figura 15).

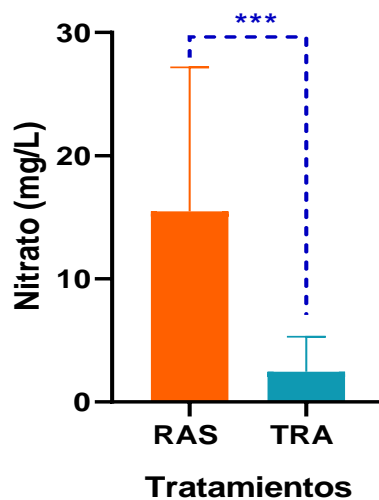


Figura 15. Media \pm D.E., de NO_3 mg/L. *** $p < 0,001$

4.1.10. Fosfato

Los resultados indican que existen diferencias significativas entre los tratamientos en las concentraciones de fosfato ($U= 11,00$, $p= 0,003$) (Figura 16).

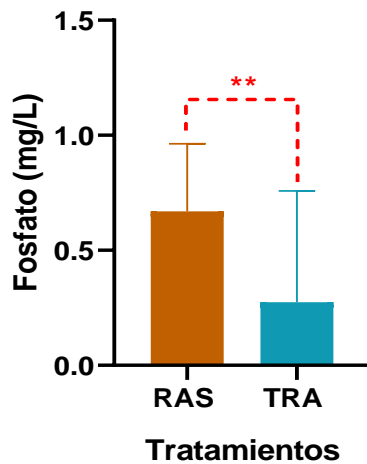


Figura 16. Media \pm D.E., de (PO_4^{3-}) mg/L. ** $p < 0,01$.

4.1.11. Tasa de remoción de amoniaco y nitrito en el sistema RAS

Los resultados muestran que el sistema RAS redujo un 18% las concentraciones de amoniaco ($X_1^2 = 19,78$, $p < 0,001$). Las concentraciones de nitrito se redujeron a un 7% comparados con los valores de la tina de producción ($X_1^2 = 7,25$, $p = 0,007$).

4.2. Indicadores de comportamiento

4.2.1. Latencia para entrar en la primera zona

Los resultados muestran que existen diferencias significativas, entre los tratamientos en la latencia para entrar en la primera zona ($U = 118,50$, $p = 0,001$) (Figura 17).

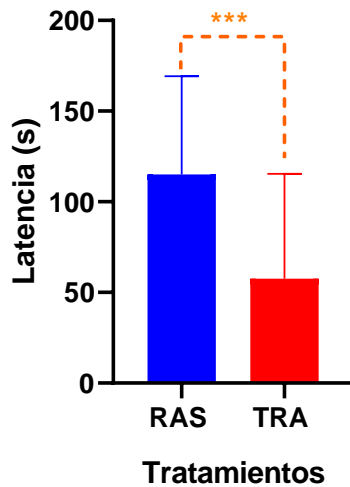


Figura 17. Media \pm D.E., de latencia para entrar en la primera zona. *** $p < 0,001$.

4.2.2. Tiempo de congelamiento

La prueba U de Mann-Whitney indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos en el tiempo de congelamiento ($U=126,00$ $p= 0,003$) (Figura 18).

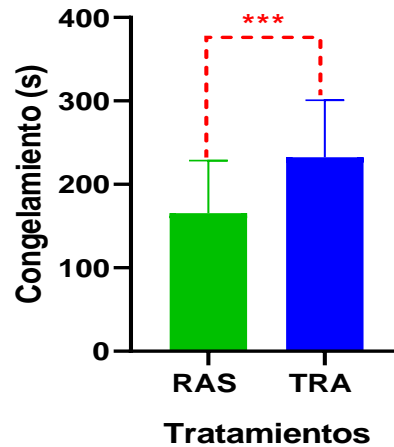


Figura 18. Media \pm D.E., de tiempo de congelamiento. *** $p < 0,001$.

4.2.3. Número de transiciones

Los resultados muestran que existen diferencias significativas, entre los tratamientos en el número de transiciones realizadas ($U= 152,50$, $p= 0,001$) (Figura 19).

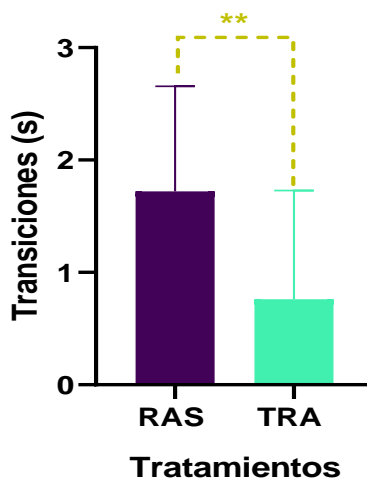


Figura 19. Media \pm D.E., de número de transiciones. ** $p < 0,01$.

4.2.4. Tiempo de permanencia en la parte superior del tanque

Los resultados muestran que existen diferencias significativas, entre los tratamientos en el tiempo de permanencia en la parte superior del tanque ($U= 149,50$, $p= 0,001$) (Figura 20).

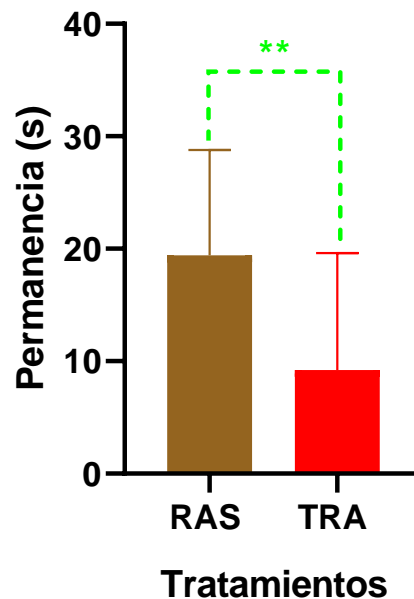


Figura 20. Media \pm D.E., de tiempo de permanencia en la parte superior del tanque.

** $p < 0,01$.

4.3. Indicadores de estrés

4.3.1. Frecuencia ventilatoria

La prueba de ANOVA indica que la frecuencia ventilatoria no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($F_{(1,40)} = 0,26$; $p = 0,61$) y semana ($F_{(4,40)} = 2,44$; $p = 0,06$), sin embargo, en la interacción tratamiento semana mostró diferencias significativas ($F_{(4,40)} = 3,03$; $p = 0,02$).

4.4. Indicadores de bienestar animal

La escala de evaluación de daño total de aletas mostró que no existe diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), semanas ($p > 0.05$) y tratamiento por semana ($p > 0.05$).

4.5. Indicadores de desempeño zootécnico

4.5.1. Peso

El análisis de covarianza muestra que la covariable peso inicial no mostró un efecto significativo en el peso ($F_{(1,579)} = 0.74$; $p = 0.38$). Los peces que se alojaron en el RAS mostraron significativamente un peso mayor que los peces alojados en el sistema tradicional ($F_{(1,579)} = 7.90$; $p = 0.005$) (Figura 21). Biológicamente existen diferencias significativas en el peso entre semanas ($F_{(9,579)} = 303.27$; $p < 0.001$). No existen diferencias significativas en la interacción tratamientos por semanas ($F_{(9,579)} = 1.01$; $p = 0.42$).

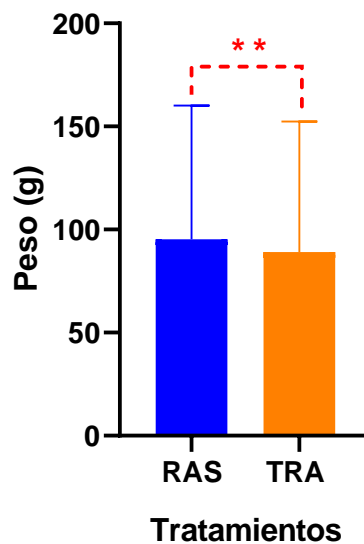


Figura 21. Media \pm D.E., de peso en g. ** $p < 0.005$.

4.5.2. Ganancia de peso

El análisis de covarianza muestra que la covariable peso inicial mostró un efecto significativo en la ganancia de peso ($F_{(1,579)}=5.17$; $p=0,02$) Se observó un efecto significativo del tratamiento ($F_{(1,579)}=7,90$; $p=0,005$), semana ($F_{(9,579)}= 303,27$; $p<0,001$) en la ganancia de peso. No se observaron diferencias significativas en la interacción tratamientos por semanas ($F_{(9,579)}=1,01$; $p=0,42$).

4.5.3. Tasa de crecimiento específico

El análisis de covarianza indica que la covariable mostró un efecto significativo en la tasa de crecimiento específico ($F_{(1,579)}=302.6$; $p<0.001$). Existe diferencias significativas entre tratamientos ($F_{(1,579)}=22.52$; $p<0.001$), semanas ($F_{(1,579)}=485.17$; $p<0.001$) y su interacción ($F_{(1,579)}=3.94$; $p<0.001$).

4.5.4. Longitud total

La prueba U de Mann-Whitney indicó que los peces no mostraron diferencia significativa en la longitud total entre el sistema tradicional y el RAS ($U = 43003,00$; $p= 0,34$). sin embargo, existen diferencias significativas entre semanas ($K-W = 510,92$; $p= 0,001$) y la interacción tratamiento semana ($K-W = 516,01$; $p= 0,001$) (Figura 22).

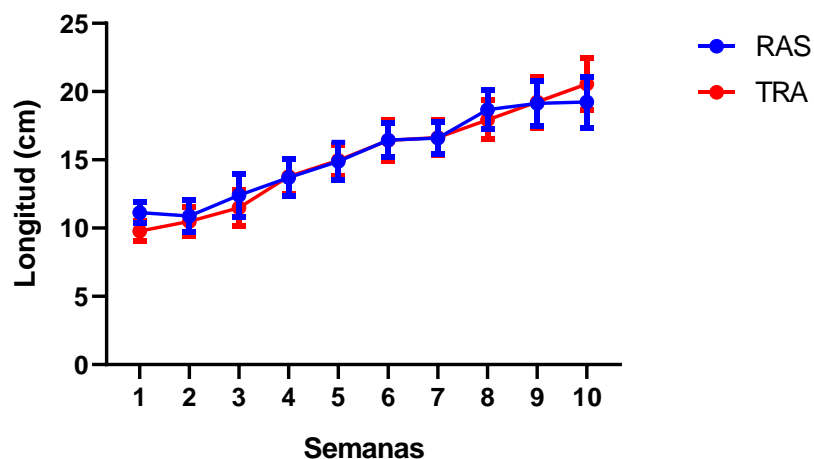


Figura 22. Media \pm D.E., Interacción tratamiento semana de longitud total en cm. *** $p<0,001$.

4.6. Consumo de agua

El sistema tradicional consumió 540 m³ de agua, mientras que el RAS consumió 90 m³ de agua ($X_1^2 = 133,33$ $p < 0,001$) (Figura 23).

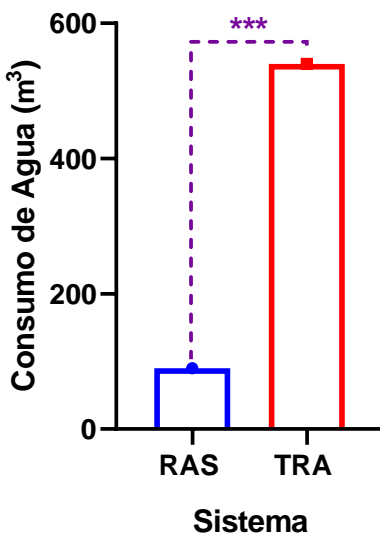


Figura 23. Media \pm D.E., de consumo de agua en m³. *** $p < 0,001$.

V. DISCUSIÓN

En este estudio los parámetros fisicoquímicos del agua en ambos sistemas se mantuvieron dentro del rango mínimo aceptable para la especie Tilapia *O. niloticus* (Alvarado & Sánchez, 2004). La concentración de oxígeno disuelto en los tanques de cultivo mostró fuertes oscilaciones registrándose un mínimo de 5.45 mg/L y un máximo de 10.15 mg/L. Al trabajar con sistemas donde la densidad de cultivo es elevada, hay que considerar el alto consumo de oxígeno disuelto que se requiere para mantener los niveles adecuados para la especie. Los peces que se establecieron en el RAS mostraron un mejor desempeño zootécnico, posiblemente debido a las mayores concentraciones de oxígeno disuelto observadas en este tratamiento, esto está en línea con lo reportado por Gómez *et al.*, (2006) quienes mencionan que no solo el oxígeno disuelto tiene un efecto directo sobre el crecimiento, sino también la calidad de agua y la cantidad de alimento no consumido que puede disminuir los niveles de oxígeno disuelto y aumentar los niveles de nitrógeno, generando condiciones desfavorables para el crecimiento de los peces.

En este mismo contexto, Boyd & Clay, (2002), indican que la importancia de mantener una estabilidad en las concentraciones de oxígeno disuelto en los cultivos tilapia puede generar una mejor tasa de crecimiento. En este sentido, Poleo *et al.*, (2011) indican que la aeración y la recirculación proporcionada por el RAS, mejora los niveles de oxígeno disuelto requerido no solo por los peces, sino también por las bacterias para la degradación de los compuestos nitrogenados y esta a su vez contribuye a mantener la materia orgánica en suspensión disminuyendo así la posibilidad de formación de zonas de descomposición anaeróbica. A pesar de las variaciones, los valores en el sistema tradicional se mantuvieron de manera general entre los límites que requieren estas especies para su crecimiento y bienestar según lo reportado por Alvarado & Sánchez, (2004).

Con respecto a la conductividad eléctrica, se obtuvieron variaciones registrándose un mínimo de 102 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sistema tradicional y un máximo de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el RAS, lo que indica una mayor presencia de iones de calcio, magnesio, sales y sólidos

solubles que incrementan significativamente estas medidas en el sistema de recirculación. Boyd, (2017) menciona que el agua conduce la electricidad a través de los iones disueltos en ella, y el agua pura es un conductor pobre de la electricidad. La mayoría de las aguas naturales, contienen iones disueltos, y como resultado, su conductividad aumenta con mayor concentración de iones totales.

Una posible explicación para los mayores valores de conductividad eléctrica observados en el RAS puede ser el uso de cal agrícola (CaCO_3), empleada al inicio del estudio como medida para ajustar el pH del agua y absorber una gran fracción de fósforo en los sedimentos del fondo, originados por los concentrados ofrecidos como alimento, ya que la tecnología RAS tiene la particularidad de ser un sistema cerrado, por ende, el agua tiende a disolver lentamente los compuestos iónicos Ca^{2+} , K^+ , Na^+ y materiales contenidos dentro del estanque favoreciendo así la conductividad eléctrica. En este mismo sentido Zamora, (2018), señala que la conductividad eléctrica se ve favorecida cuando el agua disuelve compuestos iónicos cargados.

En el RAS el TDS mostró un incremento significativo en comparación con el sistema tradicional, debido a la presencia de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) disueltos en cantidades considerables aportados por la aplicación de cal agrícola descritos anteriormente, generando así aguas duras e incrementando significativamente los TDS en el agua. El total de sólidos disueltos (TDS) está estrechamente relacionado con la conductividad eléctrica. En soluciones acuosas la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. Con un ajuste preciso del sedimentador lograremos una mayor percolación de los compuestos orgánicos e inorgánicos de menor tamaño, producidos por los residuos de alimento que no es consumido. Además, las fuertes precipitaciones que se generan durante la época lluviosa incrementan significativamente los sólidos (TDS) y iones totales, en este mismo sentido Wiley, (2020) sostiene que las aguas procedentes de zonas subterráneas, aguas superficiales, aguas residuales humanas e industriales, y las sales del ambiente que arrastra la lluvia también pueden contribuir un aumento de los TDS.

En relación con la temperatura durante el estudio, en ambos sistemas se registró un valor promedio de 27.57 ± 3.07 siendo adecuada para las especies acuícolas, manteniendo el rango recomendado para el cultivo de tilapia del Nilo según lo reportado por Gomes *et al.*, (2006). De acuerdo con Al-Asgah & Ali, (2015), la temperatura es uno de los factores ambientales con gran influencia en la acuicultura, dado que tiene un efecto fundamental para el crecimiento de los peces, así, se puede considerar que una óptima temperatura favorecerá significativamente el incremento de peso.

El pH tiene un rol crucial en los parámetros fisicoquímicos del agua tanto así que perjudica directamente la supervivencia y crecimiento de los peces. Según Lee *et al.*, (2017), la tilapia no puede tolerar valores menores de 5, pero sí pueden resistir valores alcalinos de 11. El monitoreo del pH del agua durante el periodo experimental en ambos sistemas se mantuvo en promedio de 7.62 ± 0.33 comprendidos dentro del rango óptimo de la escala de pH. Según Rebouças *et al.*, (2016), el rango óptimo de pH de la tilapia es de 5.5-8.0. Valores superiores o inferiores a estos, causan cambios de comportamiento en los peces como letargia, inapetencia, se retrasa su crecimiento y reproducción. Además, valores por debajo de 5.0 producen mortalidad en los peces, debido a fallas respiratorias, pérdidas de pigmentación e incremento en la secreción de mucus de la piel (Poot *et al.*, 2009).

Por lo general en los sistemas de recirculación, se observan altos niveles de nitrógeno amoniacal debido al alto contenido de proteína del alimento y a la alta densidad de producción; por lo tanto, no solo hay que mantener en niveles aceptables el amonio, sino también las concentraciones de nitrito, CO_2 y sólidos suspendidos. En nuestro caso los mayores valores de amoníaco, amonio, nitrito y nitrato observados en el estudio, podríamos atribuirlos a fallas del sistema de filtración principalmente en el sedimentador incrementando así la carga de materia orgánica en el filtro biológico disminuyendo su eficiencia a medida que la biomasa se incrementó, a pesar de que el sistema de recirculación contó con plásticos corrugados, planchas de polifón, gravilla en el fondo como filtro biológico, este no pudo proveer la cantidad de bacterias nitrificantes necesarias para reducir estos índices. Inclusive al realizar sifoneos

periódicos, estos niveles de nitratos y nitritos retornaron a la pileta de estudio con valores similares a los tomados en el punto de salida. En vista que los RAS son sistemas cerrados la filtración juega un papel importante en la calidad del agua como lo indican Avimelech *et al.*, (2006) señalando, que uno de los puntos clave en el diseño de un sistema RAS es la filtración biológica mediante el uso de filtros que contienen sustratos de diferentes materiales, para promover el crecimiento de la comunidad bacteriana a través de la producción de una bio-película. Por otro lado, Timmons *et al.*, (2002), indican que los filtros de grava presentan problemas con la acumulación de detritos los cuales no son rápidamente reciclados y que a su vez disminuyen el área de adherencia de las bacterias nitrificantes.

Otro problema con el sistema de filtración puede estar relacionado con el incremento de la biomasa, incrementando la cantidad de detritos provenientes de los desechos de comida y excretas los cuales consumen oxígeno en los procesos de descomposición orgánica, disminuyendo en el biofiltro las concentraciones de oxígeno perjudicando a las bacterias nitrificantes las cuales son aeróbicas obligadas, esto se apoya por el resultado reportado por Jchapell, (2008) de que sólo 1/3 aproximado del alimento ingerido por los peces es transformado en carne, el resto se metaboliza y es liberado en los estanques de cultivo como amoníaco excretado (vía branquias, orina y heces).

A pesar de que los valores de amoníaco, durante el estudio, se encontraron cercanos a los valores mínimos aceptables, no se observó mortalidad en el RAS y el sistema tradicional, ni se generó un efecto adverso en el crecimiento de los peces. En general la concentración letal del amoníaco citada para los peces varía de 0.2 a 2 mg/L, aunque la sensibilidad puede variar con el tamaño según Ismiño & Lima, (2002).

A pesar de que los valores de fosfatos se reportaron elevados en el sistema de recirculación en comparación con el sistema tradicional no se evidencio mortalidad ni daños en los peces cultivados; sin embargo, la alta densidad, más la proteína no consumida dentro del RAS pudo incrementar significativamente los niveles de fósforos dentro del sistema. En línea con esto Correia & Sánchez (2013), mencionan que los sistemas de recirculación con elevadas densidades de siembra, se hace necesaria la

aplicación de buenas prácticas de manejo en cuanto filtración se trata. En este mismo sentido Miltón (2013), indica que, en los sistemas acuícolas, el fósforo proviene fundamentalmente de las heces, orina, las aguas residuales domésticas, el alimento no consumido que son descargados en forma particulada (fase sólida) o en forma disuelta. Mientras que Gutiérrez & Malón (2006), sostienen que alrededor del 75% del N y P de alimentación no se utilizan y permanecen como desechos, incrementando los fosfatos en el agua.

Por otro lado, el RAS influyo significativamente en la tasa de remoción de amoníaco y nitrito. En este sentido, se supuso que la tasa para la nitrificación de las bacterias en el biofiltro era suficiente para mantener las concentraciones de amoníaco y nitrato dentro de los límites necesarios para la nitrificación, manteniendo la calidad del agua adecuada para el crecimiento de los peces en el sistema. La respuesta a una alta concentración de amoníaco fue la esperada durante el ensayo. Las concentraciones de NAT disminuyen significativamente en función de la tasa de carga amoniacal. El sistema de filtración disminuyó un 18% en la concentración de amoníaco y un 7% en las concentraciones de nitrito. Esta tasa de remoción puede estar asociada al pH como lo indican Sann & Baggaley (2005), quienes señalan que, normalmente las tasas de nitrificación están fuertemente influenciadas por el pH. Así mismo observaron que el establecimiento de las bacterias nitrificantes y las condiciones en las que crecen determinan su respuesta a los cambios de pH. El pH durante el ensayo se mantuvo en 7.62 ± 0.33 , un nivel óptimo para una nitrificación aceptable. La nitrificación efectiva se logra dentro de un rango de pH de 7.0 a 8.2. Mientras que Salvajey *et al.*, (2011) reportaron que el pH óptimo para la nitrificación en agua dulce es de 8.4.

Las pruebas de comportamiento mostraron ser una herramienta apropiada para evaluar la capacidad de adaptación a la tecnología RAS.

El mayor tiempo de permanencia en la parte superior del tanque, mayor número de transiciones y menor tiempo de congelamiento observados en los peces alojados en el RAS, indican un buen proceso de adaptación a la tecnología. Una posible explicación puede estar relacionada a la buena calidad del agua del sistema RAS como

lo indica Vera & Climent, (2016) quienes mencionan que los sistemas de recirculación son generadores de una buena calidad del agua que se traduce en peces con una buena “calidad de vida” (bienestar animal), mejores tasas de crecimiento. Esto también puede estar relacionado con las comunidades microbianas que son menos afectadas en el sistema RAS como lo indica Boyd, (2019), que señala que los microorganismos pueden mantener el equilibrio ecológico en estanques acuícolas adecuadamente manejados sin la necesidad de alguna suplementación de fuentes externas. Un estanque acuícola contiene muchos tipos de bacterias y un sin número de organismos que favorecen biológicamente el hábitat de los peces en sistemas acuícolas.

La tasa ventilatoria fue similar entre el sistema tradicional y el RAS. No se observaron que mayores densidades incrementarían la respuesta de la tasa ventilatoria sugiriendo la ausencia de estrés atribuida al sistema de recirculación este es un dato interesante si consideramos que la tasa ventilatoria es una respuesta del sistema nervioso simpático que se incrementa rápidamente en respuesta a un estresor (Barreto & Volpato, 2011) y puede ser utilizado como un indicador predictivo de perturbación ambiental (Bell *et al.*, 2010). Resultados similares fueron reportados por Colson *et al.*, (2015) en un estudio con trucha arcoíris en donde los autores no encontraron diferencias en valores fisiológicos de estrés en sistemas de recirculación que pueden comprometer el bienestar de los peces.

No se reportaron diferencias en la variable de salud. La escala de evaluación de daño total de aletas, alojadas en el RAS y en el sistema tradicional reporto valores similares. Resultados son contrarios a los estudios reportados por Laursem (2013), quien menciona que el daño total de aletas, en los sistemas RAS, a altas densidades generan conductas agresivas (abrasión, choque y obstrucción), aumento en la necrosis de la aleta dorsal y caudal y daños branquiales, reduciendo la ingesta de alimento, y aumentando la mortalidad. Esta posible diferencia entre nuestros resultados puede ser atribuida a la densidad que empleamos las cuales no superaron los 6Kg/m³, evitando conductas agresivas.

Las variables de desempeño zootécnico, peso, ganancia de peso, tasa de crecimiento específico, fueron mejores en el sistema de recirculación en comparación con el sistema tradicional. Resultados similares fueron reportados por Casas (2008) en un estudio evaluando los mismos tratamientos en el cultivo de cachama roja *P. brachypomus*, donde encontró mejores resultados en el RAS, concluyendo que los peces cultivados bajo sistemas de recirculación obtuvieron un mayor peso, ganancia de peso al final del cultivo, esto demuestra la adaptabilidad de estas especies y sus híbridos a los sistemas de recirculación. Sin embargo, otro estudio realizado por Venegas *et al.*, (2008), señala que las altas cargas en sistemas de recirculación acuícola generan una disminución de la tasa de crecimiento de los peces, incrementan la conversión alimenticia, afectan el bienestar de los peces dentro del sistema, esta posible discrepancia con nuestro estudio puede estar relacionada con la baja densidad que nosotros empleamos.

El sistema de recirculación mostró un ahorro significativo en el consumo de agua de 450 m³ versus el sistema tradicional durante el desarrollo del estudio, esto está en línea con lo reportado en la literatura para este tipo de sistemas en donde se considera un volumen de consumo menor al 90 % del sistema tradicional (Goddard & Delghyi, 2019). Por otra parte, Lekang (2007), indica que en los sistemas de recirculación se reduce el volumen de agua de reposición, contribuyendo al desarrollo de los pequeños acuicultores, donde el agua es un factor limitante. Además, podemos considerar con la utilización de la tecnología RAS podemos generar la reducción de la descarga de aguas residuales, esto está en línea con lo reportado por Bregnballe, (2015), que señala que los efluentes provenientes de sistemas acuícolas a través de los procesos biológicos dentro del sistema de recirculación reducirán la cantidad de compuestos orgánicos que pueden eutrofizar los cuerpos de agua superficiales y subterráneas.

VI. CONCLUSIÓN

Se construyó un sistema de recirculación RAS que mostró ser eficiente en la remoción de amoníaco y nitrito del tanque de producción.

Las variables fisicoquímicas del agua se mantuvieron dentro del rango apropiado para la especie *O. niloticus* durante el ensayo.

Durante el estudio no se encontraron diferencias en las lesiones de aletas de los peces indicando que el sistema de recirculación no afectó las variables de bienestar animal. La tasa ventilatoria fue similar entre el sistema tradicional y el RAS, de modo que, no se observó un incremento del estrés atribuido al sistema de recirculación.

Las variables de desempeño productivo observadas durante el estudio mostraron diferencias en la tecnología RAS en comparación con el sistema tradicional.

En resumen, el sistema de recirculación puede ser una alternativa sostenible para la producción de peces.

VII. RECOMENDACIONES

Basados en los resultados de este ensayo, sugerimos el control y monitoreo de la calidad del agua es de vital importancia, es por ello que los parámetros fisicoquímicos nitrato, nitrito, fosfato, amonio, amoníaco, deben monitorearse tres veces a la semana para obtener una mayor precisión de datos.

Adicionar un sistema de filtración mecánica para atrapar la mayor cantidad de sólidos suspendidos y partículas de menor tamaño, evitando el paso de estas al filtro biológico.

Disponer de una mayor cantidad de sustratos flotantes para promover la proliferación de bacterias nitrificantes en el biofiltro y de esta manera lograr resultados óptimos en nuestro ensayo.

Determinar la dosificación exacta de cal a la hora de saneamiento de las tinajas de producción, para evitar medidas elevadas en los resultados finales de los parámetros fisicoquímicos del agua.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrotendencia, (2010). Origen de los sistemas de recirculación y reciclaje de agua. AGROPEDIA. Bogotá, Colombia.

Akifumi, E. (2002). Construcción de estanques y de estructuras hidráulicas para el cultivo de peces. Panorama de Acuicultura, Vol. 12: 74 –84p.

Archila M, Ariza G, León D. (2006). Guía Práctica De Piscicultura En Colombia. Bogotá: INCODER. Colombia.

AUNAP. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, (2014). Manejo de las aguas en sistemas cerrados. Bogotá, Colombia.

Avnimelech Y, Goddard J, Ahmed S. (2005). Tilapia Harvest Microbial Floccs in Active Suspension Research Pond. Global Aquaculture Advocate, 5-6 p.

Badiola M, Basurko O, Piedrahita R, Hundley P, Mendiola D. (2018). Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. Aquacultural Engineering, 81: 57–70 p.

Badiola M, Mendiola D, Bostock J. (2012). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) Analysis: Main issues on management and future challenges, Aquacultural Engineering, 26-35 p.

Barreto, R. E., & Volpato, G. L. (2011). Ventilation rates indicate stress-coping styles in Nile tilapia. Journal of Bioscience, 36, 851-855 p.

Barreto, R.E. y Volpato, G.L. (2004). Caution for using ventilatory frequency as an indicator of stress in fish. Behav. Process. 66 43–51 p.

Barreto, R.E., Luchiari, A.C. y Marcondes, A.L. (2003). Ventilatory frequency indicates visual recognition of an allopatric predator in naïve Nile tilapia. *Behav. Process.* 60 235–239 p.

Bell, A. M., Henderson, L., & Huntingford, F. A. (2010). Behavioral y respiratory responses to stressors in multiple populations of three-spined sticklebacks that differ in predation pressure. *Journal of Comparative Physiology B Biochemical, Systems, y Environmental Physiology*, 180, 211–220 p.

Benli, A. Ç. K., & Köksal, G. (2005). The acute toxicity of ammonia on tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) larvae y fingerlings. *Turkish Journal of Veterinary y Animal Sciences*, 29, 339–344 p.

Bregnballe, J. (2015). *A Guide to Recirculation Aquaculture: An introduction to the new environmentally friendly y highly productive closed fish farming systems*. Published by the Food y Agriculture Organization of the United Nations (FAO) y EUROFISH International Organisation 100 p.

Botreau R, Bonde M, Butterworth A, Perny P, Bracke MBM. (2007). Aggregation of Measures to Produce an Overall Assessment of Animal Welfare. Part 1: A review of existing methods. *Animal* 1: 1179–1187 p.

Botreau R, Perny P, Capdeville J. (2007). Construction of product information from animal welfare assessment. *Proceedings of the Second Welfare Quality R Stakeholder Conference*, 33–36 p.

Calderer, A. (2010). *Influencia de la temperatura y la Salinidad sobre el crecimiento y Consumo de Oxígeno de la Dorada (Sparus aurata L.)* (tesis de doctorado). Universitat de Barcelona, Barcelona, España.

Careau, V., Thomas, D., Humphries, M. y Reale, D. (2008). Energy metabolism and animal personality. *The Authors. Journal compilation*, 641-653 p.

Calderón, M. (2018). Análisis del proceso productivo de tilapia (*Oreochromis sp.*) en la Estación Experimental Monterrico del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura (CEMA), USAC. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.

Castanheira, M. F., Herrera, M., Costas, B., Conceicao, L. E. 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 p.

Carvajal Echeverri, J. P. (2014). Comparación de parámetros zootécnicos y de calidad de agua de tres sistemas de precria de tilapia roja (*Oreochromis Spp.*) en el Municipio de Puerto Triunfo. Caldas- Antioquia: Corporacion Universitaria Lasallista.

Chen S, Ling J, Blancheton JP. (2016). Nitrification Kinetics of Biofilm as Affected by Water Quality Factors. *Aquacultural Engineering*, 34: 179-197 p.

Crab R, Avnimelech Y, Defoirdt T, Bossier P, (2007). Nitrogen Removal Techniques in Aquaculture for a Sustainable Production. *Aquaculture*, 1–14 p.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2006. Compliance Guide for the Concentrated Aquatic Animal Production Point Source Category. Engineering and Analysis Division Office of Science and Technology US. EPA 821-993p

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: Hacia la transformacion azul. Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Galli, O. y Sal F. 2007. Sistemas de recirculación y tratamiento de agua. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos CENADAC. Santa Ana-Corrientes, Argentina. 36 p.

Gutierrez W, Marlone F, Mert R. (2006). Biological Filters in Aquaculture: Trends and Research Directions For Freshwater and Marine Applications. *Aquacultural Engineering*, 163-171 p.

Hollingsworth C, Baldwin R, Wilda K, Elis R. (2006). Best Management Practices for fish Aquaculture in Massachusetts. Western Massachusetts Center for Sustainable Aquaculture, University of Massachusetts, USA. 53 p.

Hsien-Tsang, S., Quintanilla, M. Manual sobre "Reproducción y cultivo de tilapia". Centro de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura, El Salvador.

Hutchinson W, Jeffrey M, Sullivan D, Casement D, Clarke S. (2004) Recirculating Aquaculture Systems: Minimum Standards for Design, Construction and management. Inland Aquaculture Association of South Australia. 70 p.

Malone F, & Pfeiffer J. (2006). Rating fixed film Nitrifying Biofilters used in Recirculating Aquaculture Systems. *Aquacultural Engineering*, 34:3 389–402 p.

Martínez, C. (2012). Adaptación y Crecimiento de las Tilapias (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus*), agua de dulce. Universidad de Colima. México. 15 p.

Martínez, L. (2012). Efecto de la Dieta y otros Factores sobre la Excreción de Amonio y el Aprovechamiento del nitrógeno por la Dorada (*Sparus aurata*), y su incidencia en los cultivos de esta especie. Tesis PhD. Barcelona, ES. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). 177 p.

Martínez, D. et al., (2010), Depredación de peces de ornato por aves silvestres en una granja productora en Morelos, México, XII Congreso Nacional de Ictiología, Nayarit, Méx. 26-29 p.

Martínez, D., et al., (2010), Evaluación del crecimiento de *Astronotus ocellatus* con suplemento de probióticos en sistemas acuícolas de recirculación verticales, XII Congreso Nacional de Ictiología, Nayarit, Méx. 26-29 p.

Riaño, C. (2013). Efecto de diferentes niveles de proteína en la dieta y temperatura sobre el crecimiento y excreción de nitrógeno amoniacal total en goldfish (*Carassius auratus*), bajo condiciones de laboratorio. Tesis Pregrado. Bogotá, CO. Universidad

Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Básicas. Programa de Biología Aplicada. 69 p.

Ríos, R. (2012). Manual de Acuicultura, para la especie Tilapia Nilótica (*Oreochromis niloticus*). República de Panamá. 35 p.

Saavedra, M. (2006). Manejo del cultivo de tilapia. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Acuáticos. Managua – Nicaragua 78 p.

SAGARPA. 2006. Manual de Producción de Tilapia con especificaciones de calidad e inocuidad. Veracruz – México 125 p.

Singer A, Kessel Y. (2012). A Novel Approach to Denitrification Processes in a zero-Discharge Recirculating System for Small-Scale Urban Aquaculture. *Aquacult. Eng.* 39: 72–77 p.

Sandu S, Boardman D, Watten J. (2002). Factors Influencing the Nitrification Efficiency of Fluidized bed Filter with a Plastic Bead Medium. *Aquacultural Engineering* 26:41-59 p.

Silva P, Martins C, Engrola S, Marino G, Øverli Ø, Conceição. (2010). Individual differences in cortisol levels and behaviour of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) juveniles: Evidence for coping styles. *Applied Animal Behaviour Science*, 124: 75-81 p.

Timmons B; Ebeling M, Wheaton W, Sommerfeld T. (2002). Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. Eds. G Parada Rebolledo y M Hevia Werkmeister. 2 ed. Santiago, CL. Fundación Chile. 747 p.

Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W, Summerfelt S.T. y Vinci B.J. 2002. Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. Editado por Fundación Chile. Santiago Chile. 207 -258; 278- 279 p.

Timmons B, Ebeling M. (2010). *Recirculating Aquaculture* (2nd edn). Editorial Cayuga Aqua Ventures, USA. 489 p.

Villasante, F., Carrillo, F. O., Jaime, C. B., Galindo, L. J.(2010) Alimentos Funcionales en la nutrición de organismos acuáticos: del pasado reciente al futuro inmediato. *Industria Acuícola*. 2010, vol. 4. 36-38 p.

Watson J, Hill W. (2006). Pelagic longline fishing gear: a brief history and review of research efforts to improve selectivity. *Mar. Technol. Soc. J.*, 40 (3): 6–11 p.

Zhang C, Ohashi L. (2006). Experimental determination of the dissolved oxygen boundary layer and mass transfer resistance near the fluid-biofilm interface. *Water Sci. Technol.* 30: 47–58 p.

IX. ANEXOS



Imagen 1. Vista panorámica del RAS. Fuente: Castro, 2022.



Imagen 2. Recolección de muestras para el análisis fisicoquímico. Fuente: Castro, 2022.



Imagen 3. Sistema de recirculación vista lateral.

Fuente: Castro, 2022.



Imagen 4. Análisis de Datos.

Fuente: Castro,2022.

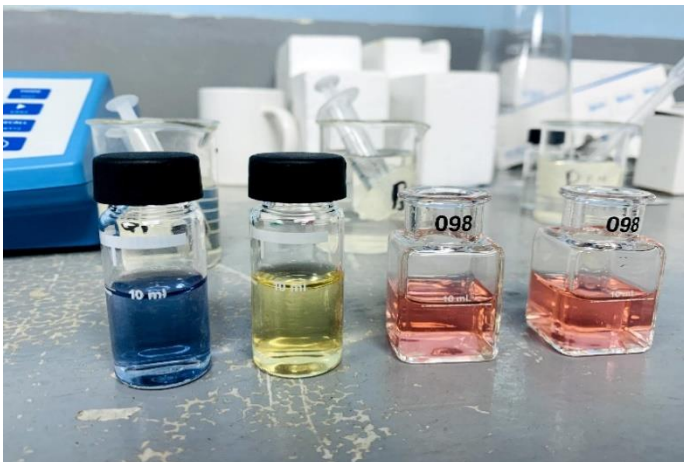


Imagen 5. Reactivos utilizados en las pruebas de parámetros fisicoquímicos del agua. De izquierda a derecha: azul: fosfato, amarillo: amonio, rosa: nitrito.

Fuente: Castro, 2022.