



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
Campus Loma Bonita

MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y PROCESAMIENTO PECUARIO

**EFFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN CON MINERALES ORGÁNICOS,
EN EL CRECIMIENTO, LA SALUD, INMUNIDAD Y SOBREVIVENCIA
DE TILAPIAS CULTIVADAS EN JAULAS EN LA PRESA "MIGUEL
ALEMÁN", OAXACA.**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN PRODUCCIÓN Y PROCESAMIENTO PECUARIO

PRESENTA:

ELEAZAR GUTIÉRREZ CUBILLAS

DIRECTOR:

DR. NICOLÁS VALENZUELA JIMÉNEZ

LOMA BONITA, OAXACA, MÉXICO 2024



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO	DEP/2024/047
ASUNTO	Autorización de impresión de tesis

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, a 18 de junio de 2024

M. EN C. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA
VICE-RECTOR ACADÉMICO
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Sirva la presente para informarle que, el jurado evaluador del examen para obtener el grado de **Maestro en Producción y Procesamiento Pecuario** del **C. Eleazar Gutiérrez Cubillas**, con número de **Matrícula 21190011**, ha autorizado la impresión del manuscrito que lleva por título **“Efecto de la suplementación con minerales orgánicos, en el crecimiento, la salud, inmunidad y sobrevivencia de tilapias cultivadas en jaulas en la presa “Miguel Alemán”, Oaxaca”**, para su posterior presentación y defensa por el sustentante.

Agradezco su atención y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

Atentamente
terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chí jí jú

Dr. José Abad Zavaleta
Jefe de la División de Estudios de Posgrado



C.c.p. Dr. Nicolas Valenzuela Jiménez– Director de tesis.
C.c.p. Dr. José Ángel Rueda Barrientos– Coordinador de la Maestría en Producción y Procesamiento Pecuario
C.c.p. M. E. Yesenia Barrientos Arenal – Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Archivo.

CAMPUS TUXTEPEC
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial.
C.P. 38301, Tuxtepec, Oax.
Tel. 01(287)8759240

www.unpa.edu.mx

CAMPUS LOMA BONITA
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.
Tel. 01(281)8729230



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO	DEP/2024/048
ASUNTO	Jurado para examen de grado

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, a 18 de junio de 2024

ELEAZAR GUTIÉRREZ CUBILLAS
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y PROCESAMIENTO PECUARIO
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Por este medio le informo que el jurado de su examen para obtener el grado de **Maestro en Producción y Procesamiento Pecuario** estará integrado por los siguientes investigadores.

Profesor Investigador	Jurado de Examen
M.C. Raúl Moreno de la Torre	Presidente
Dr. José Ángel Rueda Barrientos	Secretario
Dr. Nicolas Valenzuela Jiménez	Vocal
Dr. José Manuel Juárez Barrientos	Primer Suplente
Dr. Cecilio Ubaldo Aguilar Martínez	Segundo Suplente

Sin más por el momento, le envío saludos cordiales.

Atentamente

terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chí jí jú

Dr. José Abad Zavaleta
Jefe de la división de estudios
de posgrado.



M. en C. Héctor López Arjona
Vicerrector Académico
Vo. Bo.



C.c.p. Dr. Nicolas Valenzuela Jiménez– Director de tesis.
C.c.p. Dr. José Ángel Rueda Barrientos– Coordinador de la Maestría en Producción y Procesamiento Pecuario
C.c.p. M. E. Yesenia Barrientos Arenal– Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Archivo.

DEDICATORIA

A **Dios**, por darme la vida y permitirme cumplir esta meta de culminar mi formación como Maestro en Producción y Procesamiento Pecuario, dándome la fortaleza para vencer los desafíos que se presentaron durante este proyecto de vida.

A mis padres **Alberto Gutiérrez Santiago** y **Anastasia Cubillas Díaz**, por ser mi mayor motivación y fuente de inspiración en cada uno de los procesos de mi vida, por brindarme su apoyo incondicional, por educarme con principios y valores y por creer siempre en mí.

A mis hermanas **Faustina** y **Guadalupe** por ser parte importante de mi vida y brindarme siempre su apoyo en cada uno de los momentos que ha sido necesario.

A mis sobrinos **Ana**, **Emanuel** y **Mateo** por su afecto y cariño sincero que siempre me brindan y alegran mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad del Papaloapan** por permitirme ser parte de esta institución, prepararme profesionalmente mediante una educación integral y brindarme siempre su apoyo durante mi estancia en la institución.

Al **CONAHCYT** por brindarme la beca para cursar el posgrado y poder solventar los gastos necesarios para la culminación de este proyecto.

Al **Dr. Nicolás Valenzuela Jiménez** por su confianza y su apoyo en la dirección del proyecto de Tesis.

A la **M.C. Irma Gallegos Morales** por su apoyo y asesoramiento en la realización de los análisis implicados en el presente proyecto.

A los profesores que formaron parte del equipo de revisores de tesis, **M.C. Raúl Moreno de la Torre, Dr. José Ángel Rueda Barrientos, Dr. José Manuel Juárez Barrientos y Dr. Cecilio Ubaldo Aguilar Martínez**, por el apoyo y sugerencias brindadas que han permitido mejorar y culminar el presente trabajo.

A **Miguel Ángel Juan Antonio y su familia** por su apoyo y poner a disposición del presente trabajo las instalaciones de su unidad de producción familiar.

A **Roció López Hinojosa** por el gran trabajo en equipo y colaboración para la realización del trabajo experimental en campo y el análisis de muestras en el laboratorio.

A **Miryam Castro López** por su apoyo en los muestreos en campo y análisis de muestras en el laboratorio.

Al **M.C. José Ramón Pérez Manrique** por la donación de los minerales y su asesoría para utilizarlos de manera adecuada en el trabajo experimental.

A mis amigos **Christian Giselle Parroquin Rodríguez, María del Carmen Antonio Luis, Adolfo Hafid Hernández Rodríguez y Guillermo Cruz Rodríguez** por su apoyo durante la maestría y que estuvieron siempre conmigo en cada uno de los momentos, motivándome a seguir esforzándome para alcanzar esta meta.

A **Evaristo Ocampo Tomas** por brindarme siempre su apoyo y motivarme para culminar el presente proyecto.

Al **Dr. Marco Antonio Anzueto Sánchez y Rodolfo Hernández Pérez** por su apoyo en el transporte de muestras de la unidad de producción a las instalaciones de la Universidad del Papaloapan.

ÍNDICE

ÍNDICE	V
ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos particulares.....	2
3. HIPÓTESIS	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1. Importancia de la acuicultura	4
4.2. Sistemas de producción en acuicultura	5
4.3. Características del cultivo de tilapia.....	7
4.3.1. Cultivo de tilapia en jaulas.	8
4.3.2. Densidad de siembra.	9
4.4. Nutrición y alimentación en tilapias.....	10
4.4.1. Carbohidratos.	11
4.4.2. Lípidos.	12
4.4.3. Proteínas	13
4.4.4. Vitaminas.....	14
4.4.5. Minerales	16
4.4.6. Minerales orgánicos.....	22
4.5. Sanidad en el cultivo de tilapia	23
4.5.1. Enfermedades y resistencia de la tilapia.....	24
4.5.2. Antibióticos y resistencia bacteriana.	26
4.5.3. Aditivos funcionales y salud.....	27
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
5.1. Localización y características de la región.....	28
5.2. Características de la granja y animales	28
5.3. Tratamientos y suplementación.....	29
5.4. Toma de muestras y mediciones	32
5.4.1. Calidad de agua.....	32

5.4.2.	Muestreo o captura de peces.....	32
5.4.3.	Biometrías.....	33
5.4.4.	Toma de muestra sanguínea y análisis.....	33
5.5.	Caracterización física y análisis parasitológico externo.....	35
5.6.	Mortalidad y Sobrevivencia.....	36
5.7.	Análisis estadístico.....	36
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
6.1.	Calidad del agua.....	37
6.2.	Evaluación de crecimiento.....	37
6.3.	Parámetros hematológicos.....	41
6.4.	Caracterización física y análisis parasitológico.....	53
6.5.	Mortalidad y sobrevivencia.....	55
7.	CONCLUSIONES.....	58
8.	PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES.....	59
9.	LITERATURA CITADA.....	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
1. Requerimiento mineral por kg de alimento en la dieta de los peces de agua dulce.	17
2. Parámetros de calidad del agua en sitio experimental.	37
3. Indicadores de crecimiento de la tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, suplementadas con minerales al día 15 de tratamiento.	38
4. Indicadores de crecimiento de la tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, suplementadas o no, con minerales durante 30 días.	39
5. Rendimiento del filete de la tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, suplementadas con minerales durante 30 días	41
6. Parámetros hematológicos evaluados en la tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, al finalizar la suplementación con minerales.	44
7. Abundancia de <i>Ciclidogyrus</i> en tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán.	53
8. sobrevivencia en tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Ubicación geográfica del embalse de la presa de la presa Miguel Alemán, municipio de San Pedro Ixcatlán, Oaxaca, México.	28
2. Unidades experimentales.	30
3. Distribución de las jaulas con los diferentes tratamientos en el embalse de la presa de la presa Miguel Alemán, municipio de San Pedro Ixcatlán, Oaxaca, México.	30
4. Mortalidad acumulada de tilapia del Nilo cultivada en el embalse de la presa Miguel Alemán suplementada con minerales a los días 15 y 30 de suplementación.	55

RESUMEN

El cultivo de la tilapia del Nilo, ha avanzado en aspectos de sanidad, genética y nutrición, pero aún surgen problemas como son un lento crecimiento y alta mortalidad. Es necesario buscar alternativas sostenibles como el uso de minerales orgánicos de alta biodisponibilidad. Se probaron tres tratamientos con minerales orgánicos (Zn+Mn, Zn+Cr, Zn+Cu) y un grupo testigo. Los minerales se suministraron en el alimento tres veces al día durante 30 días. Evaluando a los días 15 y 30 el Peso Húmedo (PH), Longitud Total (LT), Ganancia de Peso (GP), Factor de Condición (FC) y Tasa de Crecimiento Porcentual (TC) parámetros de crecimiento y al finalizar se evaluó el Rendimiento del Filete (RF), la Supervivencia (S), parámetros hematológicos, prevalencia y abundancia parasitaria. El análisis de datos se realizó mediante un ANDEVA de una vía y una prueba de Tukey a un nivel de confianza del 95%. Al día 15, los peces del grupo 2 (Zn+Mn) tuvieron mayor GP ($P < 0.05$) con respecto de los demás grupos y al día 30 se obtuvo mayor GP en los peces de los tres grupos tratados ($p < 0.05$). La TC fue superior para los tres grupos tratados en comparación del grupo testigo ($P < 0.05$), siendo las mejores tasas de crecimiento las de los grupos Zn+Mn y Zn+Cr, en cuanto al RF de filete no se obtuvo diferencias ($p > 0.05$). Finalmente, la SV obtuvo un mayor porcentaje ($P < 0.05$) en todos los grupos tratados con respecto el grupo testigo. En los parámetros hematológicos se observó un conteo mayor de Glóbulos Rojos (GR) en el grupo Zn+Cr, con respecto al grupo testigo y Zn+Cu, mientras que los glóbulos blancos (GB) se obtuvo mayor recuento ($p > 0.05$) en el tratamiento Zn+Cu con respecto del grupo testigo y Zn+Cr. En los resultados parasitológicos se obtuvo una prevalencia del 100% para cada grupo, mientras que, la carga parasitaria fue mayor ($p < 0.05$) en el grupo testigo, registrándose la presencia de *Cichlidogyrus*, *Trichodina* y *Ergasilus*. Se concluye que la suplementación con minerales orgánicos (Zn, Cr, Cu y Mn) en la dieta de la tilapia del Nilo cultivada en jaulas flotantes, mejora el crecimiento y supervivencia.

Palabras clave: Tilapia, Manganeso, Zinc, Cromo, Cobre, Mortalidad.

ABSTRACT

The aquaculture of Nile tilapia has advanced in aspects of health, genetics and nutrition, but problems still arise such as slow growth and high mortality. It is necessary to look for sustainable alternatives such as the use of highly bioavailable organic minerals. Three treatments with organic minerals (Zn+Mn, Zn+Cr, Zn+Cu) and a control group were tested. The minerals were supplied in food three times a day for 30 days. Evaluating on days 15 and 30 the Wet Weight (WW), Total Length (TL), Weight Gain (GP), Condition Factor (FC) and Percentage Growth Rate (TC) growth parameters and at the end the Fillet Yield (RF), Survival (S), hematological parameters, parasite prevalence and abundance. Data analysis was performed using a one-way ANOVA and a Tukey test at a 95% confidence interval. On day 15, the fish in group 2 (Zn+Mn) had higher GP ($P < 0.05$) compared to the other groups and on day 30, higher GP was obtained in the fish from the three treated groups ($p < 0.05$). The TC was higher for the three treated groups compared to the control group ($P < 0.05$), with the best growth rates being those of the Zn+Mn and Zn+Cr groups. Regarding fillet RF, no differences were obtained ($p > 0.05$). Finally, SV obtained a higher percentage ($P < 0.05$) in all treated groups compared to the control group. In the hematological parameters, a higher count of Red Blood Cells (RBC) was observed in the Zn+Cr group, compared to the control and Zn+Cu group, while a higher count of white blood cells (WBC) was obtained ($p > 0.05$) in the Zn+Cu treatment with respect to the control group and Zn+Cr. In the parasitological results, a prevalence of 100% was obtained for each group, while the parasite load was higher ($p < 0.05$) in the control group, recording the presence of *Cichlidogyrus*, *Trichodina* and *Ergasilus*. It is concluded that supplementation with organic minerals (Zn, Cr, Cu and Mn) in the diet of Nile tilapia cultured in floating cages improves growth and survival.

Keywords: Tilapia, Manganese, Zinc, Chromium, Copper, Mortality

1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura es una alternativa para la producción de alimento de buena calidad, que contribuye a la seguridad alimentaria (Guerrero y Pelcastre, 2021). La tilapia del Nilo (*Oreochromis spp.*) es de los peces más cultivados en el mundo. Su producción en algunas regiones de México se da en jaulas flotantes (Martínez-Cordero *et al.*, 2021), presentando beneficios importantes (Tacon y Halwart, 2007), sin embargo, se presentan desafíos importantes sobre el cultivo (Tan *et al.*, 2006; Ferguson *et al.*, 2007). Asimismo, para maximizar la producción, se ha implementado una mayor densidad de siembra (Farhaduzzaman *et al.*, 2020); resultando otro factor de riesgo (Bosu *et al.*, 2016; Indahsari *et al.*, 2019). Los problemas de sanidad reducen el crecimiento, incrementan la mortalidad (Rosas-Valdez y Pérez-Ponce de León, 2008) y pueden propiciar alguna zoonosis o riesgo por el mal uso de antimicrobianos (Hernández y Fernández, 2005). Ante esto, existe la necesidad de implementar prácticas sostenibles para controlar y prevenir las enfermedades. El estado nutricional es un factor importante que determinan la capacidad de los peces para resistir enfermedades que ocurren debido al estrés y una mala nutrición (Lall, 2000).

Un equilibrio de macro y micronutrientes, como aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas y oligoelementos son esenciales para un buen desarrollo. Algunos investigadores como Li *et al.* (2007), Zhang *et al.* (2020) y Dawood *et al.* (2022), han demostrado que la adición de minerales orgánicos tiene efectos benéficos en los peces que, a diferencia de los inorgánicos, se caracterizan por presentar mayor estabilidad y evitar reaccionar con otros componentes del alimento que reducen la absorción de éstos (Nguyen *et al.*, 2018).

La suplementación de minerales orgánicos como el zinc, cobre, manganeso y bromo pueden mejorar funciones fisiológicas, aumentar la productividad y mejorar la salud (Lin *et al.*, 2008; Kiron, 2012; Nguyen *et al.*, 2018). Por lo tanto, se plantea que la suplementación con minerales orgánicos, puedan mejorar el crecimiento, los parámetros hematológicos, parámetros parasitológicos y la sobrevivencia.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la suplementación con la combinación de minerales orgánicos de alta biodisponibilidad, específicamente zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre, en el crecimiento, parámetros hematológicos, parámetros parasitológicos, la parasitofauna y sobrevivencia de tilapias del Nilo cultivadas en jaulas flotantes, en la presa Miguel Alemán en el municipio de San Pedro Ixcatlan.

2.2. Objetivos particulares

2.2.1. Analizar el efecto de los tratamientos con minerales orgánicos; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre, en los parámetros de crecimiento de la tilapia del Nilo cultivada en jaulas flotantes.

2.2.2. Evaluar el efecto de la suplementación con minerales orgánicos; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre, en el conteo de glóbulos blancos y glóbulos rojos, relacionados con la salud e inmunidad en tilapias del Nilo.

2.2.3. Determinar el efecto de la suplementación con minerales orgánicos; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre en la prevalencia e intensidad parasitaria de la tilapia del Nilo.

2.2.4. Identificar la parasito fauna que afecta a la tilapia del Nilo cultivada en jaulas flotantes

2.2.5. Analizar el efecto de los tratamientos con minerales orgánicos; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre, en la sobrevivencia de la tilapia del Nilo.

3. HIPÓTESIS

Debido a su importancia en los procesos fisiológicos y a la mayor absorción de los minerales quelados, se espera que la suplementación con minerales orgánicos combinados; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre, incrementará el crecimiento de tilapias del Nilo cultivadas en jaulas flotantes en la presa "Miguel Alemán", Oaxaca.

Dados los efectos positivos en la estimulación del sistema inmune, se espera que con la suplementación con minerales orgánicos combinados; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre mejorara el conteo de glóbulos blancos y glóbulos rojos, relacionados a la inmunidad, en las tilapias del Nilo cultivadas en jaulas flotantes en la presa "Miguel Alemán", Oaxaca.

En función a que los minerales intervienen con la formación de mucus en los peces, formando una barrera protectora modificada positivamente, se espera que con la suplementación con minerales orgánicos combinados; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre disminuirá la prevalencia e intensidad parasitaria en las tilapias del Nilo cultivadas en jaulas flotantes en la presa "Miguel Alemán", Oaxaca.

En concordancia con investigaciones previas realizadas en la región del Papaloapan, es probable identificar parásitos del género *Cichlidogyrus* en la tilapia del Nilo cultivada en jaulas flotantes en la presa "Miguel Alemán", Oaxaca.

Dada la importancia de los minerales orgánicos en las funciones biológicas y en la salud de los peces, se espera que la suplementación con minerales orgánicos combinados; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre mejorara la sobrevivencia de tilapias del Nilo cultivadas en jaulas flotantes en la presa "Miguel Alemán", Oaxaca.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Importancia de la acuicultura

La acuicultura es la producción de organismos acuáticos en agua dulce, salobre o salada, mediante técnicas que permiten incrementar la producción para consumo humano principalmente (Pillay, 1997; FAO, 2022). Es desarrollada por diferentes grupos sociales, desde personas con un estatus económico bajo en los países en vías de desarrollo, hasta las empresas multinacionales. Esta actividad involucra el cultivo de diferentes especies acuícolas, a través de una variedad de sistemas de cultivo que pueden ser desde operaciones a pequeña escala y de baja tecnología hasta sistemas industriales sofisticados (Marinho-Pereira *et al.*, 2020).

La acuicultura desempeña un papel crucial para satisfacer la creciente demanda de productos acuáticos y tiempo para minimizar los impactos ambientales y apoyar prácticas sostenibles. Dado que se espera que la población mundial alcance los 10 mil millones en el año 2050, la demanda de proteína animal, incluidos los productos acuáticos, aumentará significativamente (Anderson *et al.*, 2017; FAO, 2022).

Los peces representan tanto una contribución vital al suministro de proteína de alta calidad para los humanos como un componente importante del comercio mundial. La producción de animales acuáticos en el mundo fue de 178 millones de toneladas en el año 2020, de la cual más de 157 millones de toneladas (89 %) se emplearon para consumo humano y los 20 millones de restantes se destinaron a otros usos como la producción de harina y aceite de pescado (FAO, 2022).

La acuicultura tiene múltiples e importantes beneficios sociales, económicos y medioambientales, incluyendo un gran impacto en la seguridad alimentaria y la mitigación de la pobreza, mayores oportunidades de empleo en las comunidades rurales, mayor suministro y disponibilidad de productos alimentarios acuáticos, mejoramiento de la nutrición y el bienestar humano, mayor entrada de divisas,

reciclaje del agua y oportunidades para el riego de cultivos (Halwart y Moehl, 2006; Allison, 2014; FAO, 2022).

4.2. Sistemas de producción en acuicultura

La acuicultura es una actividad productiva heterogénea. Se trata de la producción de organismos acuáticos en entornos diferentes, como agua dulce, salobre, o salada; por lo que puede representar desafíos fisiológicos muy diferentes para cada una de las más de 400 especies que se crían en el mundo (FAO, 2020). También los sistemas de producción pueden ser muy variados pudiendo ir desde sistemas naturales con poca intervención de manejo, hasta sistemas de recirculación intensivos en los que los animales básicamente reciben soporte vital y el acuicultor tiene influencia las veinticuatro horas del día. Sin embargo, a pesar de todas estas diferencias, también existen características y funciones que todos los sistemas acuícolas comparten, lo que permite agruparlos en tres categorías principales. Estas agrupaciones se basan principalmente en la cantidad de intervención que el acuicultor proporciona en términos de las tres funciones básicas que cada sistema debe proporcionar (temperatura, oxígeno y eliminación de desechos). Además, van desde insumos y productos más bajos a insumos y productos más altos. Sin embargo, las demarcaciones entre estos sistemas no siempre son claras, pudiendo haber superposiciones entre categorías o incluso entre estas. Las tres categorías o sistemas son: sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos (Tidwell, 2012).

Los sistemas de producción extensiva, se caracterizan por el uso de pocos recursos con mínima o nula tecnificación, mientras que los sistemas semi-intensivos, implican un mayor control en la actividad y la disponibilidad de los recursos. Por su parte, los sistemas de producción intensivos, hacen uso de una mayor tecnificación y control de las condiciones que permitan producir mayor cantidad de producto por unidad de volumen o de área, así también permite cultivar especies que requieren de mayor cuidado (Hernández, 2019).

La acuicultura en jaulas flotantes es un método intensivo que implica el cultivo de peces en jaulas o redes suspendidas en cuerpos de agua como lagos, presas,

ríos u océanos. Es un sistema que se fundamenta en el mantenimiento de organismos en cautiverio dentro de un área confinada, generalmente a alta densidad, mientras excluyen a los animales no deseados. Las jaulas dependen del agua a través de ellas para suministrar a los organismos de cultivo agua de calidad suficiente para un crecimiento sostenido y eliminar desechos metabólicos problemáticos; suelen estar hechas de materiales como polietileno de alta densidad o nylon y están diseñadas para flotar en la superficie del agua. La acuicultura en este tipo de jaulas ofrece varias ventajas sobre los métodos tradicionales, y tiene un gran potencial como sistema de producción energéticamente eficiente con menores costos operativos por unidad producida que otros métodos de cultivo intensivo; si se realiza a una escala adecuada ofrece el poder utilizar una mayor densidad animal y tener una reducción del impacto ambiental (Beveridge, 2004; Tidwell, 2012). Sin embargo, también conlleva desafíos relacionados como, el control de depredadores, la presencia de parásitos, liberación de un exceso de nutrientes y químicos al ecosistema circundante, además de que la proximidad de los peces puede aumentar el riesgo de brotes de enfermedades. Los sitios con mala circulación de agua han dado lugar a condiciones bajas de oxígeno disuelto y a la acumulación de desechos metabólicos que causan malas condiciones de calidad del agua, crecimiento reducido de los peces, contaminación de sedimentos, devastación de la biota bentónica, brotes de enfermedades y, a menudo, mortalidades significativas (Beveridge, 2004; El-Sayed, 2020). Por lo que es necesario el realizar un monitoreo constante de las jaulas y hacer un manejo sanitario y nutricional adecuado para mantener la salud de los peces y así maximizar el potencial de la acuicultura en jaulas flotantes como un método sostenible y eficiente (Halwart *et al.*, 2007; Asmah *et al.*, 2021). En México la acuicultura ha logrado seleccionar las especies para cultivo según las condiciones de cada región, existiendo algunas especies con capacidad de adaptarse a diferentes condiciones de cultivo como es la tilapia del Nilo, que se cultiva en casi toda la República Mexicana, siendo la principal especie cultivada en los estados de Veracruz y Oaxaca (Martínez-Cordero *et al.*, 2021). La actividad acuícola en nuestro país ha sido

impulsada por instituciones gubernamentales creando e incentivando centros acuícolas en diferentes puntos estratégicos en el país con el propósito de cultivar y repoblar diversos cuerpos de aguas como son presas, lagunas y lagos, con diferentes especies, esto con el objetivo de incrementar la producción y disponibilidad de alimento para consumo humano (Platas-Rosado, 2017). A pesar de no encontrarse dentro de los países con alta producción acuícola a nivel mundial, México ha sido uno de los países en vías de desarrollo con alta producción en volumen y en diversidad de especies en América, usando para los cultivos especies como la tilapia del Nilo (FAO, 2022).

4.3. Características del cultivo de tilapia

El cultivo de tilapia puede realizarse en sistemas extensivos y semi-intensivos en estanques de tierra, sin embargo, el problema de la escasez mundial de agua dulce y la competencia con otras actividades productivas, requiere que los sistemas de producción sean altamente eficientes, lo que ha provocado que el cultivo de tilapia pase gradualmente de sistemas tradicionales semi-intensivos a sistemas de producción más intensivos. En este sentido, las tilapias siempre han sido consideradas como la especie ideal para el cultivo intensivo debido a los atributos de su especie, como su tolerancia a condiciones de altas densidades, rápido crecimiento, elevada productividad, por su resistencia al estrés, la manipulación y una variedad de condiciones ambientales (bajas concentraciones de oxígeno, diferentes salinidades) y la aceptación de una amplia gama de alimentos naturales y artificiales (Ávila et al., 2017; Assefa y Abunna, 2018).

La especie *Oreochromis niloticus* se ha cultivado con éxito en sistemas intensivos y se ha convertido en la especie de cultivo preferida, su cultivo intensivo ha aumentado de manera comercial en todo el mundo, en estanques, tanques, canales, jaulas, sistemas de recirculación y acuaponía, siendo los parámetros de calidad del agua, la nutrición y la densidad de población los factores más importantes que determinan el éxito del cultivo intensivo de esta especie (Watanabe et al., 2002). En México se producen varias cepas de tilapia en casi todos los rincones del país, ya sea en jaulas o estanques y en diferentes

densidades y su producción es muy importante en términos económicos y de soberanía alimentaria para prácticamente todas las entidades federativas (Martínez-Cordero *et al.*, 2021).

4.3.1. Cultivo de tilapia en jaulas. Este tipo de cultivo ha recibido considerable atención en los últimos años como medio de explotación intensiva con una baja inversión de capital, en comparación con otros sistemas tradicionales de cultivo intensivo. Este sistema se ha practicado de forma comercial desde hace varias décadas en países tropicales y subtropicales en Asia, África y América Latina, y sigue expandiéndose a un ritmo muy rápido (Bardach *et al.*, 1972; Watanabe *et al.*, 2002; Moura *et al.*, 2015; Costa *et al.*, 2017). Algunas de las principales ventajas del cultivo de tilapia en jaulas es que se puede llevar a cabo en diversos cuerpos de agua, como ríos, lagos, embalses, estanques y agua de mar; además, la jaula ayuda a que el ciclo de reproducción de la tilapia se interrumpa y por lo tanto se pueden cultivar poblaciones mixtas con machos y hembras, y ofrece mayor facilidad y bajo costo de cosecha. Por otro lado, también se requiere de un mayor monitoreo de la respuesta de los peces a la alimentación y de su salud, ya que existe un riesgo considerable de la aparición de brotes de enfermedades. La buena productividad de la tilapia en jaulas depende de una serie de factores como la calidad del agua, el nivel de profundidad del agua y la cepa de tilapia, la densidad de población, el tamaño y la forma de la jaula, la calidad del alimento y la frecuencia de alimentación. Las jaulas varían mucho respecto a dimensiones y materiales con que se construyen, en producción comercial su tamaño es de 4 a 20 m³ cuando la producción se efectúa con tecnología relativamente sencilla, o de 50 a 100 m³ para producciones más tecnificadas, todo en función del costo y de la densidad a manejar (El-Sayed, 2007; Hecht, 2007; Ofori *et al.*, 2010). Las tilapias cultivadas en jaulas grandes generalmente tienen un mejor crecimiento, una reducción de la pérdida de alimento y una mejor supervivencia incluso con niveles bajos de oxígeno (Campbell, 1985; McGinty, 1991), pero el tamaño de la jaula utilizado depende de los recursos y el nivel de tecnología disponible. En México, el cultivo de tilapia en jaulas se practica generalmente en jaulas de tamaño pequeño a

mediano, y por lo general se utilizan materiales disponibles localmente para su construcción (Fitzsimmons, 2000; Martínez-Cordero *et al.*, 2021). Las jaulas se pueden construir en una gran variedad de formas (rectangulares, cuadradas o cilíndricas), utilizando materiales como el bambú o tubos de PVC, nylon y otras mallas sintéticas. La medida de las mallas tiene un impacto significativo en la producción y se recomienda que sea de 1,9 cm o mayor para permitir la libre circulación del agua (Masser, 2012). En México, el cultivo en jaulas representa la mayor parte de la producción acuícola de tilapia; el país posee diversos cuerpos de agua grandes, como represas y embalses, adecuados para este tipo de cultivo, sin embargo, también se enfrenta el desafío de tener condiciones climáticas variadas, como alta temperaturas del agua y mortalidad asociada a ella (Martínez-Cordero *et al.*, 2021). Otro inconveniente del cultivo en jaulas son los impactos ambientales, como la liberación de nitrógeno, nutrientes y contaminantes en cuerpos de agua debido al alimento no consumido (Masser, 2012).

4.3.2. Densidad de siembra. La densidad de población o densidad de siembra en el sistema de cultivo, se refiere a la cantidad de peces que se mantienen en un volumen determinada (peces sembrados por m³). Este parámetro tiene un impacto directo en la productividad, el bienestar y la sostenibilidad ambiental de los peces en cultivo. La densidad de población óptima en los cultivos de tilapia es un tema complejo que depende de varios factores, pero en general, se ha demostrado que densidades de población demasiado bajas o demasiado altas pueden tener impactos negativos en el bienestar y la producción de los peces (Saraiva *et al.*, 2022). En tilapia, investigaciones sobre el impacto de la densidad de población en cultivos de alevines y adultos (Yi *et al.*, 1995; El Nouman, *et al.*, 2021; El-Sayed 2002), o en diversos sistemas de cultivo, como tanques, lagos y jaulas han mostrado la conexión directa entre la adecuada densidad de población y el desarrollo adecuado de los animales (Saraiva *et al.*, 2022). Las altas densidades de población pueden provocar un aumento de la agresión y el estrés en la tilapia.

En los sistemas de cultivo en jaulas, la densidad de siembra influye en el rendimiento de la tilapia, ya que afecta su supervivencia, el crecimiento, el comportamiento, la calidad del agua y la alimentación. Aumentar la densidad de tilapias puede aumentar el rendimiento total, pero reduce el crecimiento individual de los peces (Asase, 2013; García *et al.*, 2013; El Nouman, *et al.*, 2021; Saraiva *et al.*, 2022). En un estudio en Brasil (Asase, 2013) se encontraron las mejores tasas de crecimiento en tilapia a una densidad de 50 peces m³, en comparación con otras densidades. Además, el riesgo de brote de enfermedades, mortalidad de peces y deformidades también es menor a baja densidad. En granjas comerciales, los principales factores predisponentes a los brotes de *Streptococcus iniae* son las altas densidades de población y las altas temperaturas del agua (Shoemaker *et al.*, 2000).

4.4. Nutrición y alimentación en tilapias

Actualmente se tienen avances importantes en la nutrición y alimentación de las tilapias, enfocándose a los nutrientes requeridos para un mejor crecimiento, por ello los avances respecto a la proteína han sido desplazados al determinar los requerimientos a nivel de aminoácidos, sin embargo, para un balance adecuado de los requerimientos nutricionales, influyen factores como la edad del pez, la talla, así como la fuente de la proteína y la cantidad de energía que esta proporcione por ración (Torres-Novoa y Hurtado Nery, 2012).

La fuente de energía en los alimentos es de gran importancia en la producción de tilapias, dado que influye en la eficiencia para el desarrollo del pez y se requiere en diferentes rutas metabólicas en las que se utiliza para un mejor crecimiento (Zafra *et al.*, 2019). Los requerimientos de energía canalizadas al mantenimiento de las tilapias son bajas debido a que no requieren regular la temperatura corporal, influyendo en un mejor rendimiento productivo (Torres-Novoa y Hurtado Nery, 2012).

El rendimiento productivo de los cultivos de tilapia está influenciado significativamente por la nutrición y las prácticas de manejo alimenticio, por lo que es muy importante adoptar estrategias adecuadas para el correcto manejo

de estos dos factores, con el fin de optimizar los rendimientos económicos (Sousa *et al.*, 2012; El-Sayed, 2020). Se han empleado diferentes estrategias para mejorar la utilización de los alimentos y nutrientes en la tilapia, desde establecer una formulación del alimento concentrado bien equilibrada, para complementar o sustituir a los alimentos naturales, hasta aditivos funcionales como enzimas, prebióticos, probióticos, estimulantes del consumo y el uso de hormonas (El-Sayed 2020), más aun, para promover un adecuado y mejor crecimiento de las tilapias, es necesario proporcionar un alimento de calidad y para las tilapias en jaulas implica un alimento natural (fitoplancton y zooplancton) o concentrado comercial. El alimento natural mejora la calidad nutricional de los peces y reduce la necesidad de suplementar alimento artificial en el cultivo en jaulas, sin embargo, también puede presentar deficiencias que llevan a una nutrición inadecuada aumentando la susceptibilidad a enfermedades (Masser, 2012).

La tilapia presenta distintos requerimientos de proteínas, aminoácidos esenciales, lípidos, ácidos grasos esenciales, carbohidratos, vitaminas y minerales, y estos requerimientos están en función de las etapas del ciclo de vida de los peces (Bautista *et al.*, 2017; El-Sayed, 2020). El crecimiento de la acuicultura se debe, entre otras cosas, a que se han desarrollado formulaciones de alimento balanceado específicas para las diferentes especies y etapas de cultivo con los requerimientos suficientes de lípidos, vitaminas y minerales, que permiten lograr un factor de conversión alimenticia bajo, sin embargo, para lograrlo, se deberán tener las condiciones óptimas para su cultivo y un buen linaje genético de los organismos cultivados (Perea-Román, 2018).

4.4.1. Carbohidratos. La nutrición de carbohidratos en la tilapia ha sido estudiada ampliamente, por ejemplo, se ha demostrado que existe una programación nutricional temprana mediante la administración de dietas muy ricas en carbohidratos durante la fase de alevines, lo que mejora el crecimiento y la eficiencia metabólica en la tilapia adulta (Kumkhong, *et al.*, 2020). Esta especie tiene la capacidad de adaptarse eficazmente a la ingesta de carbohidratos, se han realizado estudios comparando la digestibilidad de diversos ingredientes

vegetales utilizados como sustitutos del aceite y de la harina de pescado en la dieta, donde se utilizan ingredientes como la harina de soya, harina de linaza, harina de canola, harina de semilla de algodón, harina de girasol, harinilla de trigo, gluten de maíz, salvado de arroz, cebada y centeno (Dong *et al.*, 2010; Obirikorang *et al.*, 2015). La digestibilidad de estos nutrientes en la dieta depende en gran medida de su composición, la lignina, celulosa y hemicelulosa se consideran poco digestibles y sin valor nutricional para la tilapia, incluso pueden tener un efecto negativo sobre el rendimiento y la digestibilidad de otros nutrientes como la proteína y grasa, pero aun así pueden contribuir a las necesidades energéticas, ya que su fermentación en el intestino, produce ácidos grasos volátiles benéficos que son rápidamente absorbidos, además también pueden tener posibles efectos inmunomoduladores y prebióticos (Maas *et al.*, 2020). En general, comprender el papel de los carbohidratos en la nutrición de la tilapia es importante para optimizar el crecimiento y la eficiencia metabólica, se sabe que es necesario incorporar niveles apropiados de carbohidratos en las dietas de los peces para mejorar la disponibilidad de energía, y que la falta de carbohidratos aumentará el catabolismo de proteínas y lípidos (Kim y Kaushik 1992; Wilson, 1994, Krogdahl *et al.*, 2005).

4.4.2. Lípidos. Los lípidos tienen un papel crucial en el crecimiento y rendimiento de la tilapia. son la principal fuente de energía y ácidos grasos esenciales para el crecimiento de los peces. La incorporación de lípidos en la dieta sirve como fuente de energía, ayuda a conservar las proteínas para el crecimiento del cuerpo y reduce los costos de la alimentación, además, los lípidos facilitan la absorción de vitaminas, influyen en la actividad de las enzimas digestivas, en genes de la respuesta inmune y en los procesos antioxidantes en la tilapia (Lim *et al.*, 2011; Guiscafré, 2019; Jiang *et al.*, 2020).

Los lípidos son la principal fuente de energía y ácidos grasos esenciales para el crecimiento de los peces (Watanabe, 1982). Si se reduce el contenido de proteínas y se aumenta el contenido de lípidos en el alimento se mejora la capacidad de síntesis de proteínas de los peces y se reduce la contaminación por nitrógeno (Li *et al.*, 2011). El aceite de pescado es un ingrediente dietético

importante en los alimentos formulados para peces marinos carnívoros debido a su contenido de ácidos grasos esenciales, en particular ácidos grasos poliinsaturados, que contribuyen a mejorar el crecimiento y la inmunidad de los peces (Ng y Chong 2004; Ruyter *et al.*, 2015), sin embargo, la ingesta excesiva de lípidos provoca la deposición de grasa y afecta el crecimiento (Chatzifotis *et al.*, 2010; Rahim *et al.*, 2015). Se ha determinado que el nivel óptimo de lípidos en la dieta para alevines es de alrededor del 8,5 %, lo que conduce a una mejor ganancia de peso, eficiencia alimenticia y supervivencia. En tilapia adulta, el requerimiento mínimo de lípidos en las dietas es del 5 %, y se ha reportado que tilapias alimentadas con dietas entre 10 y 15 % de lípidos, tienen un mejor crecimiento y eficiencia en la utilización de proteínas. En general, comprender y optimizar la nutrición lipídica en la tilapia de cultivo puede contribuir a mejorar el crecimiento, la composición corporal y la salud general de los peces.

4.4.3. Proteínas. La nutrición proteica también es un aspecto importante de la alimentación de la tilapia. Las proteínas son consideradas los nutrientes más costosos de los alimentos formulados y de los más indispensables, que proporcionan los aminoácidos esenciales y no esenciales para el crecimiento y el metabolismo de los peces. Tienen una gran variedad de funciones fisiológicas en los peces, son moléculas estructurales o bien, actúan como enzimas, por lo que potencian directamente el crecimiento corporal, el estado antioxidante y la resistencia al estrés, sin embargo, un exceso de proteínas en la dieta se metabolizaría para uso energético, lo que aumentaría la excreción de nitrógeno amoniacal y podría deteriorar la calidad del agua de la acuicultura.

El nivel óptimo de proteína para el máximo crecimiento de la tilapia varía dependiendo de factores como la cepa y el tamaño del pez, la calidad de la fuente de proteína y la cantidad de energía no proteica en la dieta. Algunos estudios sugieren que un nivel de proteína de 35% es adecuado para la tilapia juvenil, mientras que otros indican que un nivel de proteína de 40% favorece el máximo crecimiento y eficiencia alimenticia, no obstante, hay un límite máximo, en donde demasiada proteína no brinda beneficios adicionales, por lo que es importante

considerar otros factores como el costo del alimento y la liberación de contaminantes nitrogenados en el hábitat (Siddiqui *et al.*, 1988).

La nutrición proteica también juega un papel crucial en la salud de la tilapia, los diferentes niveles de proteína y energía digestible en la dieta pueden afectar el crecimiento, la salud del hígado y los parámetros hematológicos, así como el microbioma intestinal y el perfil metabólico de la tilapia (El-Sayed, 2020).

En cuanto a aminoácidos, no sólo son componentes básicos de las proteínas, sino también son reguladores de vías metabólicas clave, necesarias para el mantenimiento, el crecimiento, la reproducción y la inmunidad. La tilapia del Nilo tiene los mismos requerimientos de diez aminoácidos esenciales que otros peces (arginina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina) para mantener las funciones fisiológicas normales de sus células y tejidos. Estas moléculas juegan un papel crucial en la salud de la tilapia, por ejemplo, se ha demostrado que la suplementación dietética con aminoácidos específicos, como arginina, glutamina, glutamato, leucina y prolina, mejora el crecimiento, mejora la expresión genética y reduce el exceso de grasa corporal en los animales (He, *et al.*, 2016; Furuya *et al.*, 2023).

4.4.4. Vitaminas. Las vitaminas son compuestos orgánicos esenciales para el crecimiento, la salud, la reproducción y el mantenimiento, y generalmente se requieren en muy pequeñas cantidades en la dieta de los animales. Los peces sólo pueden sintetizar vitaminas en cantidades que son insuficientes para su desarrollo, crecimiento y mantenimiento, por lo que deben suministrarse a través de la dieta. Estos compuestos actúan como cofactores o sustratos en reacciones metabólicas y son esenciales para una amplia variedad de procesos, incluyendo la utilización de los nutrientes, la respuesta inmunológica, protección antioxidante y otros procesos fisiológicos básicos (El-Sayed, 2020). Son clasificadas en hidrosolubles y liposolubles, lo que tiene implicaciones para su almacenamiento a largo plazo en los tejidos de tilapia. Dentro del grupo de las hidrosolubles, están las vitaminas del complejo B (tiamina B1, riboflavina B2, niacina B3, ácido pantoténico B5, piridoxina B6, biotina B7, ácido fólico B9, cianocobalamina B12), la vitamina C, la colina y el inositol, estas dos últimas catalogadas como

“moléculas similares a las vitaminas” y son componentes esenciales de los fosfolípidos. Las vitaminas liposolubles incluyen a las vitaminas A (retinol), D (calciferol), E (tocoferol) y K o filoquinona (Halver, 2002; El-Sayed, 2020).

En general, la deficiencia de vitaminas en peces puede provocar un crecimiento deficiente o aumentar la susceptibilidad a las infecciones, ya que se afecta el metabolismo, la funciones y la estructura de las células. Las vitaminas del complejo B desempeñan funciones cruciales en los procesos metabólicos de los peces y en la producción de glóbulos rojos, son esenciales para un óptimo crecimiento y utilización de nutrientes en la tilapia. Una deficiencia de éstas, causan una baja tasa de crecimiento, síntomas neurológicos y hemorragias.

La vitamina A es muy importante para la visión, los procesos metabólicos y el crecimiento de los peces, una deficiencia puede conducir a una disminución en las tasas de supervivencia y crecimiento; por su parte, la vitamina D3 también es esencial para un buen crecimiento de la tilapia, mejora la absorción de calcio a nivel intestinal, es necesaria para la homeostasis del calcio y el fósforo, e influye en la acción de la hormona paratiroidea sobre los huesos. Los peces no sintetizan vitamina D de manera significativa, y dependen completamente de fuentes dietéticas para satisfacer sus necesidades, pero acumulan grandes cantidades de vitamina D en el hígado y los tejidos grasos, incluida la grasa muscular, y esto hace que el pescado sea una fuente dietética importante de vitamina D (Shiau y Lin, 2019).

La vitamina E y su suplementación en la dieta de la tilapia, ha sido bien estudiada debido a sus potentes propiedades antioxidantes en los peces antes y después de la cosecha; además de su importancia como modulador del metabolismo de los ácidos grasos y en el crecimiento de los peces. Las funciones antioxidantes de la vitamina E incluyen la eliminación de radicales libres que pueden provocar daños a componentes celulares como la membrana, ácidos nucleicos y enzimas, provocando condiciones patológicas; tilapias deficientes de vitamina E presentan signos como anorexia, ganancia de peso reducida, hemorragias cutáneas, eritropoyesis alterada, degeneración muscular y coloración anormal de la piel (Shiau y Lin, 2019).

En cuanto a la vitamina K también es un nutriente esencial para el óptimo crecimiento la tilapia y la ayuda en sus procesos fisiológicos, desempeña un papel vital en la coagulación sanguínea y la mineralización ósea en los peces. Por lo general, la premezcla de vitaminas incluida en los alimentos comerciales para tilapia incluye vitamina K3 (Halver, 2002; El-Sayed, 2020).

4.4.5. Minerales. Estos micronutrientes juegan un papel muy importante en la dieta de la tilapia. Todos los animales acuáticos necesitan minerales para sus funciones fisiológicas y bioquímicas y para mantener sus procesos vitales normales, y los peces tienen la capacidad de absorberlos de la dieta y del agua circundante. Los minerales son elementos inorgánicos necesarios para diversas funciones metabólicas como la osmorregulación, la generación y transmisión del impulso nervioso, la contracción muscular y la regulación del pH de la sangre, además forman parte de huesos y tejidos blandos, y actúan como cofactores o componentes estructurales de enzimas, vitaminas, hormonas y pigmentos (El-Sayed, 2020). De acuerdo con las necesidades del cuerpo animal, los minerales se clasifican en dos categorías, los macrominerales, que son aquellos que se necesitan en grandes cantidades para el organismo animal, y los microminerales (oligoelementos o minerales traza) que se requieren en cantidades relativamente pequeñas por los animales (El-Sayed, 2020). En los peces son esenciales los macrominerales como el calcio, fósforo, magnesio y los oligoelementos como el cobre, yodo, hierro, manganeso, selenio y zinc, en cantidades óptimas (Cuadro 1), los cuales son particularmente importantes para el crecimiento de los peces y el funcionamiento normal de sus sistemas biológicos, ya que desempeñan un papel vital en el funcionamiento de las enzimas responsables de procesos fisiológicos como la digestión, la osmorregulación, el intercambio de gases y el equilibrio ácido-básico, además de relacionarse con el buen funcionamiento del sistema inmunológico (Dawood, 2021; Lall y Kaushik, 2021; Dawood *et al.*, 2022). La fuente de los minerales, de la dieta y el agua en la que se crían los peces, pueden tener un impacto significativo en el equilibrio mineral de los peces (Prabhu, 2016). A continuación, se presentan las funciones más importantes de algunos de estos microminerales esenciales para la tilapia.

Cuadro 1. Requerimiento mineral por kg de alimento en la dieta de los peces de agua dulce.

Minerales	Requerimiento mineral (mg/kg de alimento)
Calcio	50-75
Fosforo	0.5-1
Magnesio	40-50
Potasio	15-30
Cobre	4-9
Yodo	1-4
Hierro	30-175
Manganeso	6.96-15
Selenio	0.15-0.38
Zinc	15-40
Cromo	0.4-0.06

Datos tomados de: Tang *et al.*, 2017; Garzón y Gutiérrez-Espinoza, 2019 y Dawood, *et al.*, 2022.

4.4.5.1. Cobre (Cu): El cobre es un oligoelemento esencial para la tilapia y otros organismos, se encuentra en muy pequeñas cantidades en las células de los seres vivos y funciona como cofactor en varias enzimas antioxidantes, involucradas en el metabolismo del hierro (Fe), en actividades inmunológicas, en la producción de energía celular y la producción de melanina (Johnson *et al.*, 2015; Feokistova y Clark, 2018; Lall y Kaushik, 2021). El cobre también es esencial para mantener las concentraciones normales de hemoglobina (Hb) en la sangre, se ha demostrado que la deficiencia y los niveles altos tóxicos de cobre (30 mg/kg) en la dieta disminuyen la Hb y el hematocrito en aves, mamíferos y tilapias (Shiau y Ning, 2003).

El cobre se encuentra disponible en el agua, sin embargo, su concentración es insuficiente para satisfacer los requerimientos nutricionales de la tilapia, por lo que la dieta es la principal fuente para llevar a cabo sus funciones fisiológicas de crecimiento y desarrollo (Torres-Novoa y Hurtado-Nery, 2012). La deficiencia de cobre puede causar retraso en el crecimiento, baja eficiencia alimenticia y diversas enfermedades en la tilapia (EL-Erian *et al.*, 2023). Por otro

lado, los niveles elevados de este mineral, pueden inducir efectos tóxicos y reducir la utilización de nutrientes y el rendimiento productivo de los peces (Tang *et al.*, 2017). Se ha demostrado, que la ingesta excesiva de cobre retrasa el crecimiento de la trucha arcoíris y la tilapia híbrida (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*). Este efecto tóxico se relaciona con daño celular de los tejidos, ya que el ion cobre adicional estimula la síntesis de especies reactivas de oxígeno que destruyen los lípidos, proteínas y el ADN (EL-Erian *et al.*, 2023). Los requerimientos dietéticos de cobre dependen de la especie de pez, la edad y el plan de alimentación, pero para la tilapia Shiau y Ning (2003) reportaron que el requerimiento mínimo de cobre en la dieta para su cultivo, es de aproximadamente 4 mg de cobre/Kg de alimento, mientras que 9 mg de cobre / Kg son necesarios para estimular la respuesta inmune no específica (Tang *et al.*, 2017).

4.4.5.2. Manganeso (Mn): El Mn también es esencial en la dieta de los peces para su crecimiento normal, participa en el metabolismo proteico y energético, favorece la mineralización ósea con prevención de anomalías esqueléticas, participa en la defensa celular contra los radicales libres y la regulación metabólica (Lall y Kaushik, 2021). La importancia del manganeso en los procesos bioquímicos mencionados radica en su función como activador de enzimas y en que forma parte de diversas metaloenzimas como la superóxido dismutasa (Lin *et al.*, 2008; Castañeda, 2020), enzima considerada como uno de los agentes más importantes en el proceso de prevenir y contrarrestar los efectos negativos de las especies reactivas de oxígeno.

En peces el manganeso se puede absorber a través de las branquias e intestino (Lin *et al.*, 2008; Lall y Kaushik, 2021), sin embargo, también se han reportado deficiencias de este mineral, que se caracterizan por la reducción del crecimiento, pérdida de equilibrio, reducción del consumo de alimentos, problemas reproductivos, anomalías esqueléticas y aumento de la mortalidad (Reigh *et al.*, 2007). De acuerdo con Lin *et al.* (2008), el requerimiento de manganeso para tilapias híbridas es de 6.96 manganeso/kg, con una mayor actividad de la

superóxido dismutasa en la dieta suplementada con manganeso que en tilapias sin suplemento de este mineral. Otros investigadores recomiendan de 12 a 15 manganeso/kg para la tilapia del Nilo, dependiendo de la concentración de manganeso en el agua y de la etapa de los peces (Watanabe *et al.*, 1988; Al-Kahtani, 2009; Lall y Kaushik, 2021).

También es muy importante señalar, que una concentración de Mn por arriba de los 15 manganeso/kg nivel óptimo, puede ser tóxico para los peces, y da lugar a una alta acumulación en los tejidos del pez, pudiendo ser un riesgo para los seres humanos que lo consuman (Cruz *et al.*, 2015). El exceso de manganeso en los peces les causa estrés, afecta su sistema inmune y el metabolismo de los carbohidratos, puede causar inflamación y daño tisular, además de alterar la homeostasis de otros metales (Campos-Granados, 2015).

4.4.5.3. Zinc (Zn): El zinc es un oligoelemento de los más esenciales, para el adecuado crecimiento y desarrollo, de todos los animales, incluyendo los peces. Dentro de sus funciones principales está la de cofactor en varios sistemas enzimáticos, formando parte de un gran número de metaloenzimas, incluidas la superóxido dismutasa, fosfatasa alcalina, anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa, carboxipeptidasa, glutamato deshidrogenasa, lactato deshidrogenasa, ribonucleasa, y DNA polimerasa (Makwinja y Geremew 2020; Lall y Kaushik, 2021). Actúa contra las especies reactivas del oxígeno o radicales libres, formando parte del sistema de defensa antioxidante, también se asocia con otras funciones estructurales, catalíticas y reguladoras, incluido el metabolismo de las proteínas, metabolismo energético, osmorregulación, formación de huesos y escamas (Fukada *et al.*, 2011; Dawood, *et al.*, 2022). Contribuye a las funciones normales de los sistemas nervioso, hepático e inmunológico en humanos y peces, desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la integridad de la membrana y en el control de la infiltración de células inflamatorias (Evans y Halliwell, 2001; Maret, 2017). También está implicado en la formación de varias proteínas estructurales, citocinas, enzimas, receptores y factores de crecimiento, y se ha demostrado que los iones de zinc, están involucrados en la transducción de señales intracelulares, sobre todo en

células inmunitarias (Lall y Kaushik, 2021). Algunos estudios han investigado las funciones potenciales y el nivel óptimo (15 – 40 mg/kg de alimento) de zinc en el metabolismo, fisiología, reproducción, crecimiento, inmunidad y resistencia a enfermedades infecciosas en animales acuáticos (Lall y Kaushik, 2021). Se ha informado de un incremento en el peso de las tilapias del Nilo al aumentar un suplemento de zinc en la dieta (Eid y Ghonim, 1994; Li y Huang, 2016), y por el contrario, se ha informado de mala digestibilidad de proteínas y carbohidratos, presencia de cataratas y lesiones cutáneas, además de crecimiento reducido en tilapias alimentadas con una dieta deficiente en zinc (Dawood, *et al.*, 2022); las células que regulan funciones inmunes también decrecen cuando hay deficiencia de zinc (de la Guardia Peña *et al.*, 2011).

Los niveles de zinc en la dieta deben ajustarse adecuadamente para mantener todos esos procesos celulares y las respuestas biológicas necesarias para la vida, los peces pueden absorber zinc del agua, pero absorben más eficientemente el proporcionado en la dieta, a través del intestino, mientras que las branquias son solo un órgano auxiliar para la absorción de este mineral (Hogstrand, 2012). El zinc absorbido de la dieta, se une a la mucosidad del epitelio intestinal y posteriormente es transportado como iones de zinc o como un complejo zinc-aminoácido, sin embargo, su biodisponibilidad es afectada por niveles dietéticos de otros ingredientes como el hierro, calcio, fósforo y el ácido fítico o fitato. Este último puede formar un complejo con minerales como el zinc, hierro y manganeso en el tracto gastrointestinal, impidiendo su absorción. Además, las dietas con altos niveles de fosfato tricálcico reducen la biodisponibilidad de zinc, ya que el calcio promueve la unión del zinc a fitatos (Sato, 1987; Lall y Kaushik, 2021). Casi todo el zinc que llega a las células se encuentra unido a proteínas, péptidos y aminoácidos, se estima que el 10% de todas las proteínas de las células eucariotas se unen al zinc, y se sugiere que hay aproximadamente 3000 proteínas de zinc presentes en diferentes especies de peces (Lall y Kaushik, 2021). La homeostasis del zinc está estrictamente controlada en todos los tejidos y células por estas proteínas transportadoras, que juegan un papel clave para una amplia gama de funciones inmunológicas,

endocrinas, reproductivas, estructurales y neuronales, pero también existe una pequeña reserva fluctuante de zinc citoplasmático libre que participa en las vías de señalización celular, muchos de estos factores de transcripción contienen elementos estructurales secundarios que son estabilizados por el zinc (Hogstrand, 2012; Rosas-Romero y Covarrubias-Gomes, 2020).

4.4.5.4. Cromo (Cr): El cromo es un micromineral esencial que desempeña funciones importantes en las respuestas nutricionales y fisiológicas de los peces (Küçükbay *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2010). Se encuentra comúnmente en formas trivalente y hexavalente en pequeñas cantidades en el medio ambiente y en los alimentos, teniendo diferente efecto según la forma y concentración en la que se encuentre (Bagchi *et al.*, 2002; Mehrim 2014). Puede causar toxicidad si se encuentra disponible en exceso en el agua, mientras que, si se suministra en la alimentación, tiene un impacto positivo. El cromo está involucrado en diferentes procesos fisiológicos de los peces como el crecimiento y algunas funciones enzimáticas, y es esencial para el metabolismo normal de las grasas y carbohidratos. Estas respuestas fisiológicas, dependen de la concentración, origen y composición química del cromo, así como de las características biológicas e individuales de los peces (Mehrim 2014; Bagheri *et al.*, 2023). El cromo se absorbe a través de las branquias y se transporta a través de la sangre a los tejidos, aunque los mecanismos exactos de su metabolismo se desconocen. De igual manera, se desconocen con exactitud las dosis adecuadas en la dieta de los peces, pero Mehrim (2014) sugiere que 400 a 600 microgramos de picolinato de cromo por Kg de dieta son los niveles más apropiados y más seguros para alevines de tilapia del Nilo. Sin embargo, las concentraciones de cromo no deben de excederse, ya que puede ser tóxico para los peces, el cromo hexavalente se considera más tóxico que su forma trivalente debido a su fácil permeabilidad a través de la membrana celular, sin embargo, se reduce a la forma trivalente que se puede unir al material genético provocando alteraciones tóxicas y mutagénicas pudiendo dañar intestino, branquias, hígado y riñones (Bakshi y Panigrahi, 2018; Lall y Kaushik, 2021).

4.4.6. Minerales orgánicos. Las dietas comerciales para peces contienen casi todos los minerales necesarios y, además, los peces pueden obtenerlos del agua, aun así, pueden presentarse deficiencias de minerales en estos animales (Nguyen *et al.*, 2018). A pesar de esta capacidad para absorber minerales del agua de cultivo y su presencia en los ingredientes del alimento, existen factores como la fuente de mineral, la composición iónica del agua, la interacción con otros componentes como vitaminas, fitatos y otros minerales, que pueden reducir la biodisponibilidad de estos minerales (Lall y Lewis-McCrea, 2007; Nguyen *et al.*, 2018). Los minerales de fuentes inorgánicas suelen tener una absorción limitada, por lo que, al incrementar las dosis en las dietas, también hay mayores cargas residuales que tienden a acumularse en el sedimento, impactando de manera negativa al medio ambiente (Davis, 2015). Se deben garantizar niveles suficientes para evitar deficiencias, pero también evitar una ingesta excesiva de minerales provenientes de la dieta o de las branquias que pueda causar toxicidad, además de que es necesario considerar el impacto de los minerales transportados por el agua desde el punto de vista ambiental, ya que la liberación de minerales del alimento no consumido o no digerido y de la excreción urinaria puede causar eutrofización de las aguas naturales, lo que requiere una consideración adicional en la formulación del alimento (Lall y Kaushik, 2021). Algunos estudios han demostrado altas cargas de nutrientes, fósforo y nitrógeno, en las mallas de la jaula, aumento de materia orgánica en el sedimento y sedimentación de metales pesados provenientes del alimento (Phillips *et al.*, 1985; Melo Júnior *et al.*, 2023). Por esta razón, es muy importante considerar una dieta con minerales traza de alta biodisponibilidad que permitan el buen crecimiento y buen estado de salud en los peces de manera sostenible (Nguyen *et al.*, 2018).

Los minerales orgánicos son compuestos minerales que están unidos a un agente quelante, como un aminoácido u otra molécula orgánica, para mejorar su absorción en el tracto digestivo (Kratzer y Vohra, 1986; Caetano-Silva *et al.*, 2021). Por lo general, se trata de minerales unidos a un aminoácido individual como la metionina o glicina, la quelación con estas moléculas, impide posibles

reacciones químicas del mineral con otras sustancias en el estómago e intestino que puedan afectar su absorción. El zinc, el manganeso, el hierro, el cobre, el cromo y el selenio son los más frecuentemente unidos a un aminoácido; estas moléculas queladas, poseen mayor absorción a nivel intestinal y mayor biodisponibilidad, en comparación con minerales de fuentes inorgánicas (Caetano-Silva *et al.*, 2021). Se ha demostrado que estos minerales quelados con moléculas orgánicas, interactúan menos entre sí en el tracto digestivo y también son menos sensibles a la acción inhibitoria de otros compuestos debido a su reducida solubilidad en agua, mejorando su disponibilidad para la absorción, e impidiendo grandes pérdidas de minerales y posibles contaminantes al ambiente (Ashmead, 2012). Entre los principales minerales traza de importancia en la dieta de la tilapia del Nilo, se encuentran el zinc, manganeso, cobre y cromo, y se ha demostrado en diferentes estudios que la suplementación con estos minerales orgánicos en lugar de los inorgánicos en alimentos para peces, favorecen la salud y el rendimiento en la producción (Nguyen *et al.*, 2018). Sin embargo, también se ha reportado resultados contradictorios, mientras algunos estudios muestran que el uso de este tipo de minerales ha mostrado tener efectos positivos sobre el crecimiento y la inmunidad de los peces (Apines-Amar *et al.*, 2004; Ashmead, 2012; El-Sayed *et al.*, 2023), en otros estudios no se observan mejorías con su uso (Watanabe *et al.*, 1997; Savolainen y Gatlin, 2010; Domínguez *et al.*, 2017). Sin embargo, los minerales orgánicos, al estar unidos a un aminoácido, son de mayor biodisponibilidad que los inorgánicos, lo que significa que el animal los absorbe, almacena y utiliza mejor, por lo que los efectos fisiológicos de cada mineral, se pueden lograr con minerales traza orgánicos en niveles significativamente más bajos que los minerales traza inorgánicos y al mismo tiempo mejorar el rendimiento de los peces y reducir la excreción de minerales al medio ambiente (Ashmead, 2012).

4.5. Sanidad en el cultivo de tilapia

Los avances en la nutrición, mejoramiento genético y sanidad en organismos acuáticos con fines comerciales han sido fundamentales para el desarrollo de la actividad acuícola, influyendo principalmente el desarrollo de alimentos de buena

calidad y el buen manejo general de los cultivos, en el crecimiento de la acuicultura y su intensificación.

La intensificación de los cultivos en acuicultura favorece la presencia de factores predisponentes que pueden conducir a brotes de enfermedades, particularmente aquellas relacionadas con el estrés, donde se ve afectado el funcionamiento del sistema inmunológico de los animales, situación aprovechada por los microorganismos presentes en el ambiente o en el animal para provocar daño (Kiron, 2012).

4.5.1. Enfermedades y resistencia de la tilapia. La tilapia históricamente ha sido considerada una especie resistente al estrés y a las enfermedades (Ávila *et al.*, 2017), no obstante, en las condiciones de los cultivos intensivos, esta consideración es puesta en duda constantemente, ya que la presentación de enfermedades ha incrementado a medida que se intensifica su producción (Assefa y Abunna 2018; Machimbirike *et al.*, 2019; Haenen *et al.*, 2023). Lo anterior puede deberse a que la intensificación de los cultivos, en muchas ocasiones traen consigo sobrepoblación, reducción de la calidad del agua y un mayor estrés de los peces cultivados, lo que a su vez los hace más susceptibles a diversas enfermedades infecciosas (Debnath *et al.*, 2023). Dentro de las limitantes para el crecimiento de la producción acuícola de tilapia, las enfermedades son uno de los principales factores (Assefa y Abunna, 2018). A nivel mundial, se estima que las pérdidas en el sector acuícola debido a enfermedades superan los seis mil millones de dólares anuales, y casi el cincuenta por ciento de la pérdida de producción se debe a enfermedades que son más graves en los países en desarrollo (Stentiford *et al.*, 2017; Assefa y Abunna 2018). Los factores biológicos resultan ser uno de los problemas de mayor importancia en el cultivo de organismos acuáticos, pues las condiciones de estos cultivos facilitan la reproducción y crecimiento acelerado de diferentes agentes como virus, bacterias, hongos, y parásitos (Haenen *et al.*, 2023). Muchos de los factores biológicos se consideran endémicos de ciertos lugares, pero con el desarrollo de la actividad y la implementación de especies introducidas con fines de acuicultura, se ha generado una propagación de estos factores en

diversas partes del mundo, ya que los organismos introducidos pueden estar infectados por algún agente biológico que logra adaptarse e infectar a los organismos nativos (Flint, 2020). El cultivo de peces, se ha visto afectado por diferentes agentes biológicos, destacando entre estos la presencia de parásitos y bacterias, provocando efectos como lento crecimiento, reducción de la tasa de fertilidad, afectación del sistema inmunológico, y haciéndolos susceptibles a otros factores ambientales de contaminación que pueden originar altas mortalidades (Zago *et al.*, 2014) y propagación a otras granjas. La tilapia puede ser infectada por diversos géneros y especies bacterianos, incluidas *Vibrio spp*, *Aeromonas spp*, *Pseudomonas spp.*, pero es particularmente susceptible a la infección por *Streptococcus dysgalactiae*, *S. agalactiae* y *S. iniae*, que ahora se encuentran entre los patógenos bacterianos más importantes y causan pérdidas económicas considerables en todo el mundo (Debnath *et al.* 2023; Haenen *et al.*, 2023). También hay que considerar la presencia de parásitos que han quedado en segundo plano por muchos años y que ocasionan daños directos en los peces criados en jaulas, con afectaciones indirectas como la predisposición a infecciones bacterianas, ya que se han encontrado prevalencias parasitarias elevadas (95%), principalmente por monogéneos en arcos branquiales y aunque en ocasiones no se observan efectos negativos aparentes, provocan un estrés constante en los animales (Gutiérrez-Cubillas *et al.*, 2017; Sitjà-Bobadilla *et al.*, 2019).

Para mitigar esos impactos negativos provocados por las enfermedades infecciosas en los cultivos de tilapia, es imperativo abordar todos los problemas de salud mediante la utilización de enfoques validados científicamente, así como métodos que sean adecuados a nivel local, los métodos más eficaces para controlar las enfermedades infecciosas de los peces incluyen la utilización de técnicas mejoradas de manejo y reproducción, la aplicación de restricciones al movimiento, la utilización de especies genéticamente resistentes, la administración de suplementos dietéticos, la aplicación de inmunoestimulantes no específicos, el uso de vacunas, la incorporación de prebióticos y probióticos, la utilización de productos vegetales medicinales, la implementación de medidas

biológicas para desinfección del agua, y la aplicación de compuestos antimicrobianos (Assefa y Abunna 2018; Haenen *et al.*, 2023; Bondad-Reantaso *et al.*, 2023).

4.5.2. Antibióticos y resistencia bacteriana. Como en todo sistema de producción, el uso de antimicrobianos en la acuicultura es bien reconocido y se analizan alternativas para disminuirlo cada vez más, ya que su uso inadecuado es una amenaza considerable para el desarrollo y crecimiento de una la acuicultura exitosa y sostenible (Haenen *et al.*, 2023; Bondad-Reantaso *et al.*, 2023). El impacto de la acuicultura implica el uso de antibióticos para la prevención y el tratamiento de algunas enfermedades, que puede traer como consecuencia, la inducción de resistencia a los antibióticos en las bacterias circundantes en el agua. Una vez desencadenada, la resistencia a los antibióticos se propaga fácilmente entre las comunidades microbianas acuáticas y, desde allí, puede llegar a las bacterias patógenas humanas, haciendo inútil el uso de antibióticos para la salud humana (Pepi y Focardi, 2021). Otra consecuencia del uso de antibióticos, es la presencia de sus residuos en el pescado y sus productos, que constituye un desafío socioeconómico para la inocuidad de los alimentos y la salud pública, además de provocar rechazos de importaciones e impactos negativos en el comercio internacional. Dentro de las principales implicaciones para la salud pública, se incluyen el desarrollo de resistencia a los antimicrobianos, alergias, algunos pueden ser cancerígenos, daño renal, mutagenicidad y alteraciones de la microbiota intestinal (Okocha *et al.*, 2018; Bondad-Reantaso *et al.*, 2023). Los antibióticos pueden utilizarse en la acuicultura para prevenir enfermedades antes de que ocurran, para tratar animales enfermos, y para mejorar la tasa de crecimiento y la conversión alimenticia (Pepi y Focardi, 2021). A nivel mundial, dentro de los grupos de antimicrobianos más utilizados se encuentran las quinolonas, tetraciclinas, los anfenicoles, macrólidos, betalactámicos y las sulfonamidas (Schar *et al.*, 2020; Caputo *et al.*, 2023).

En un estudio reciente (Schar *et al.*, 2020), en donde se abordan las tendencias mundiales en el uso de antimicrobianos en la acuicultura, se menciona que para

algunas especies de peces la intensidad del uso de antimicrobianos supera los niveles de consumo en animales terrestres y humanos, y se resalta la necesidad urgente de realizar un mejor manejo de los antimicrobianos por el bien de la salud pública y la salud de los ecosistemas.

4.5.3. Aditivos funcionales y salud. En los últimos años, el desarrollo y el uso de aditivos funcionales ha mostrado rendimientos prometedores para los acuicultores. Como se ha mencionado anteriormente, debido a la intensificación en los cultivos acuícolas y a la consiguiente propagación de la resistencia a los antimicrobianos entre animales y humanos, es necesario descubrir nuevas alternativas para la profilaxis y el tratamiento de enfermedades. En peces, se han utilizado aditivos alimentarios no nutritivos en el alimento, para asegurar la ingestión, digestión y absorción de los nutrientes de la dieta, o bien, se han utilizado aditivos alimentarios que pueden ser ingredientes nutritivos que actúan mediante métodos directos o indirectos en el sistema del animal, su uso ha mostrado buenos resultados en términos de crecimiento, resistencia a enfermedades y mejoras en la biodisponibilidad de minerales, producción de enzimas y control de la microbiota intestinal (Alemayehu *et al.*, 2018).

Existe una amplia gama de aditivos alimentarios utilizados en acuicultura, como los emulsionantes, prebióticos, probióticos, algas marinas, hongos, microalgas, enzimas, ácidos orgánicos, aglutinantes de micotoxinas, compuestos fitogénicos o fitobióticos, levaduras, antioxidantes e inmunoestimulantes, éstos se agregan durante la preparación del alimento para preservar las características nutricionales de una dieta, para mejorar la biodisponibilidad de ciertos nutrientes como proteasas, para eliminar la presencia de compuestos antinutricionales como las fitasas, y para mejorar la salud, el crecimiento y la eficiencia alimenticia de los peces. Entre estos productos alternativos también se puede incluir el uso de minerales orgánicos como el zinc, manganeso y cobre como inmunoestimulantes y por sus importantes acciones en los procesos metabólicos y fisiológicos de los peces (Prabhu *et al.*, 2016; Alemayehu *et al.*, 2018).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización y características de la región

El estudio se realizó en campo abierto en el embalse de la presa Miguel Alemán, en el municipio de San Pedro Ixcatlán, Oaxaca localizado en las coordenadas geográficas 18° 8' 36.04"N y 96°30' 37.4"O (Figura 1), a una altura de 101 msnm. El lugar cuenta con un clima cálido húmedo con temperatura media anual de 26 °C y precipitación promedio de 1,800 a 2,900 milímetros anuales; la temporada de lluvias abarca del mes de mayo hasta el mes de septiembre (PMD, 2008).

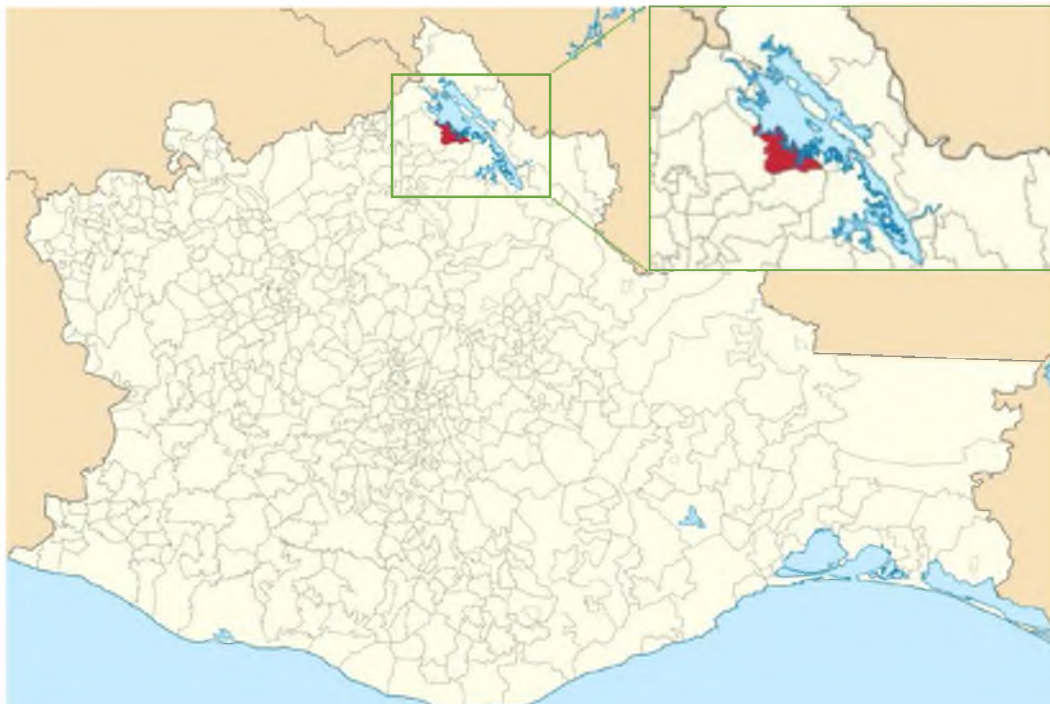


Figura 1. Ubicación geográfica del embalse de la presa de la presa Miguel Alemán, municipio de San Pedro Ixcatlán, Oaxaca, México.

5.2. Características de la granja y animales

Se utilizaron 1,800 juveniles de tilapia del Nilo provenientes un laboratorio comercial ubicado en Arroyo de Banco, Valle Nacional, Oaxaca. La recepción de las crías de tilapia se llevó a cabo en la unidad acuícola de la Universidad del Papaloapan *campus* Loma Bonita, en donde fueron sembrados en un estanque de geomembrana con dimensiones de 6 m de diámetro y 1 m de profundidad,

acondicionado con aireación constante. Los animales permanecieron, con vigilancia y atención constante, durante un período de 30 días en el mismo estanque. Para su nutrición se utilizó alimento balanceado marca Nutripec® de 1.5 mm con 44% de proteína, el cual fue proporcionado a saciedad aparente. Después de ese período, los peces fueron trasladados hacia una granja comercial propiedad de un productor de tilapia en la presa Miguel Alemán. Para el traslado, los peces fueron sometidos a un ayuno de 24 h previo al transporte a la unidad de producción acuícola en donde se realizó el experimento, para esto se acondicionó un contenedor de 1000 L de agua con un sistema de aireación integrado por un blower y un disco difusor. A la llegada a la unidad de producción acuícola, los peces se mantuvieron durante 30 días en una jaula flotante para su adaptación y habituación en el agua de la presa, posteriormente fueron separados en 12 jaulas flotantes con dimensiones de 3x3x2 m, cada una. Se colocaron 150 tilapias de tres meses de edad (117.53 ± 21.17 g) en cada jaula, al iniciar el experimento. Cabe mencionar que el manejo de los animales y jaulas se adecuó a la rutina del productor, brindando la alimentación en tres raciones diarias a saciedad aparente durante un lapso de treinta días.

5.3. Tratamientos y suplementación

Al llegar a los tres meses de edad con un peso de 117.53 ± 21.17 g los animales con su jaula fueron asignados a uno de cuatro grupos (n=450), tres que recibieron minerales agregados al alimento y a un grupo testigo sin suplementación mineral, mediante un diseño experimental completamente al azar.

Los minerales que se suplementaron, fueron seleccionados con base en la literatura disponible y a su disponibilidad comercial. Se tomó como base al zinc (Zn), debido a que es uno de los más importantes minerales cuya deficiencia causa daños severos en las tilapias, además se utilizó combinado con manganeso (Mn), cromo (Cr) y cobre (Cu) debido a la importancia de estos y a su disponibilidad comercial. La suplementación mineral tuvo una duración de 30 días continuos, y los tratamientos utilizados quedaron conformados como se muestra en el siguiente esquema (Figura 2):



Figura 2. Unidades experimentales.

Se utilizaron tres repeticiones por tratamiento, la distribución de cada tratamiento se realizó aleatoriamente. Debido a la disponibilidad de espacio y al manejo de la granja, se utilizó una sola línea de jaulas, a lo largo del espejo de agua. La distribución al azar de las jaulas con los diferentes tratamientos quedó de la siguiente manera:



Figura 3. Distribución de las jaulas con los diferentes tratamientos en el embalse de la presa de la presa Miguel Alemán, municipio de San Pedro Ixcatlán, Oaxaca, México.

Se midieron parámetros de calidad de agua con el uso de un fotómetro marca HANNA®, con el propósito de conocer las condiciones físico-químicas bajo las cuales se realizó el experimento. Para el manejo alimenticio se utilizó alimento comercial (Campi® y El Pedregal Silver Cup®) con un 45 % de proteína. La adición del suplemento se realizó sobre el alimento comercial (ON TOP) utilizando un gel aglutinante para su fijación, previo a la alimentación. Dicho gel aglutinante se realizó con grenetina diluida en agua en baño maría a una concentración de 30 g/L. En el alimento de cada grupo fue adherido el producto comercial

correspondiente, compuesto por un complejo mineral-aminoácido (mineral orgánico) de la empresa Zimpro®. Para cada grupo, la dosificación de los aditivos minerales fue de la siguiente manera:

- **1. Testigo.** Se proporcionó únicamente alimento comercial con 45 % de proteína cruda sin ningún mineral y se añadió solo la gretina diluida en agua de la misma forma en que se utilizó como vehículo de adherencia en los demás tratamientos.
- **2. Zn+Mn.** Se proporcionó el complejo mineral-aminoácido Availa® Zn 120, el cual contiene una concentración de 12 % de zinc orgánico, más el complejo mineral-aminoácido Availa® Mn 80, el cual contiene una concentración de 8 % de manganeso orgánico. A razón de 0.5 g de Zn y 0.375 g de Mn por kg de alimento comercial.
- **3. Zn+Cr;** Se proporcionó el complejo mineral-aminoácido Availa® Zn 120 (12 %) más el complejo mineral-aminoácido Availa® Microplex, el cual contiene una concentración 0.1 % de cromo orgánico. A razón de 0.5 g de Zn y 0.4 g de Cr por kg de alimento comercial.
- **4. Zn+Cu;** Se proporcionó el complejo mineral-aminoácido Availa® Zn 120 (12 %) más el complejo mineral-aminoácido Availa® Cu, el cual contiene una concentración de 10 % de cobre orgánico. A razón de 0.5 g de Zn y 0.4 g de Cu por kg de alimento comercial.

La preparación de alimento se realizó semanalmente en el cuarto de alimentos de la granja de la siguiente manera: se preparó un litro de gel aglutinante para adherir los minerales por cada 15 kg de alimento, se dejó enfriar a temperatura ambiente, posteriormente se pesó el alimento y se colocó en un contenedor en el que se añadió la mezcla de minerales al alimento generando movimiento circular para lograr homogeneizar el alimento con la preparación de cada tratamiento. Una vez preparado el alimento se extendió, formando capas finas que permitiera mejor ventilación para su secado a temperatura ambiente durante

cuatro horas y posteriormente se empacó en bolsas Ziploc previamente etiquetadas. En el caso del grupo testigo se manejó igual que los tratamientos, excepto que no se añadió ningún mineral, solamente el gel aglutinante.

Los horarios de alimentación se ajustaron de acuerdo al manejo establecido en la granja, por lo que se alimentó en tres raciones a saciedad aparente (8:00, 13:00 y 17:00 horas aproximadamente). Para control del alimento consumido se llevó el registro del alimento utilizado por cada tratamiento.

5.4. Toma de muestras y mediciones

Para evaluar la salud y la inmunidad de los animales, se tomaron muestras de sangre para el conteo celular y de hemoglobina, además de realizar la evaluación física del animal, la carga parasitaria y la calidad del agua. Para evaluar el crecimiento se realizaron mediciones biométricas en cada grupo a los días 0, 15 y 30 del tratamiento, y finalmente se evaluó la sobrevivencia de las tilapias al final del ciclo. De igual manera se registró la mortalidad por jaula, retirando los peces muertos diariamente, si es que los hubo. Para todo esto, los peces fueron manipulados con cuidado extremo durante las mediciones procurando evitar un estrés innecesario en los animales, para procurar su bienestar y evitar cualquier interferencia con los efectos de los tratamientos. A continuación se detallan todas las mediciones y procedimientos:

5.4.1. Calidad de agua. Esta variable fue medida en el área donde estuvieron las jaulas, cada 15 días durante el experimento, con el propósito de conocer las condiciones de calidad de agua, se midieron; temperatura, oxígeno disuelto, amonio pH, fosfato, nitrato y cloro.

5.4.2. Muestreo o captura de peces. Los peces se capturaron de manera aleatoria siguiendo el mismo procedimiento en cada jaula. Se utilizó una red de aro y se colocaron en un contenedor con agua tomada de la presa y aireación para cada muestreo. Todos los procedimientos se realizaron siguiendo las normas estrictas de ética y procurando el bienestar animal en todo momento como se indica en el “Código Sanitario para los Animales Acuáticos” (OIE, 2021).

5.4.3. Biometrías. Se evaluó el crecimiento de los peces mediante biometrías siguiendo los procedimientos descritos por Lagler (1978) y Pauly (1983). Para esto, se capturaron una muestra de 15 peces por jaula al iniciar el tratamiento, y posteriormente a los días 15 y 30. Se obtuvo el peso húmedo (PH) con una báscula granataria (marca OHAUS®) con una sensibilidad de ± 1 g y con un ictiometro (marca AQUATIC®) se midió la longitud total (LT). Con los datos obtenidos en cada biometría se determinó el factor de condición (FC), ganancia de peso (GP) y tasa de crecimiento porcentual (TC), utilizando las siguientes formulas:

$$\text{Factor de condición.} \quad FC = 100 \left(\frac{PH}{LT^3} \right)$$

$$\text{Ganancia de peso.} \quad GP = \overline{PH} \text{ final} - \overline{PH} \text{ inicial}$$

$$\text{Tasa de crecimiento porcentual.} \quad TC = \frac{\overline{PH} \text{ final} - \overline{PH} \text{ inicial}}{\overline{PH} \text{ inicial}} \times 100$$

5.4.4. Toma de muestra sanguínea y análisis. Al finalizar los 30 días del experimento, se capturaron 15 peces al azar de cada tratamiento para obtener una muestra sanguínea. Se tomaron de cada pez aproximadamente 2 ml de sangre de la vena caudal con una jeringa heparinizada mediante a la técnica descrita por Wittwer (2021). Una vez tomada la muestra se colocó en tubos con anticoagulante (EDTA) y se transportaron en frío, al Laboratorio Químico Biológico de la Universidad del Papaloapan, Campus Loma Bonita para su inmediato análisis. Los parámetros hematológicos que se midieron fueron: hematocrito, hemoglobina, proteína total del plasma, glóbulos blancos y glóbulos rojos, así también, se determinó la concentración de hemoglobina corpuscular media, volumen corpuscular medio de glóbulos rojos y hemoglobina corpuscular media.

5.4.4.1. Hematocrito (HT): El porcentaje de glóbulos rojos en el volumen total del plasma se midió mediante la técnica del microhematocrito (Mondal y Budh, 2019) para esto, se utilizaron tubos capilares llenados con sangre y sellados en un extremo con critoseal, para ser centrifugados a 11, 000

RPM durante 5 minutos en una microcentrífuga para hematocrito (marca VELAB); la lectura se hizo manualmente con ayuda de un lector de tarjetas de microhematocrito.

5.4.4.2. Proteína total del plasma (PT): Los capilares centrifugados utilizados en el micro hematocrito se cortaron a nivel del volumen celular con un lápiz diamante y se separó el plasma, el cual se colocó en la celda de un refractómetro proteinómetro para su lectura la cual está dada en gr/dl.

5.4.4.3. Hemoglobina (HG): Se determinó por el método de la cianometahemoglobina tomando como base lo descrito por Blaxhall y Daisley (1973), que consistió en hacer reaccionar la sangre con el reactivo Drabkins (que contiene cianuro de potasio y ferricianuro de potasio), que oxida la hemoglobina a metahemoglobina la cual a su vez pasa a cianometahemoglobina. Para cada muestra, se colocaron 5 ml de reactivo Drabkins en dos tubos, uno que sirvió como “blanco” solo con el reactivo y otro que se mezcló con 0.02 mL de sangre añadida con una micropipeta. Ambos tubos se sometieron a temperatura ambiente durante 10 minutos, para posteriormente ser vaciados cada uno en las cubetas del espectrofotómetro y realizar la lectura a 540 nm.

5.4.4.4. Recuento de glóbulos rojos (GR) y glóbulos blancos (GB): El conteo celular de GR se realizó visualmente mediante el uso de la cámara de Neubauer. Para ello, la muestra de sangre se diluyó en la solución de Hayem para preservar y fijar los glóbulos rojos. Se utilizó una pipeta de Thoma cuenta-glóbulos llenándola con 0.5 ml de sangre y luego con la solución de Hayem hasta que la mezcla sangre-diluyente llegó a la marca de 101, se tapó la pipeta y se agitó suavemente. Se preparó la cámara de Neubauer, y se llenó por capilaridad con la muestra, finalmente se procedió a hacer el conteo en el microscopio óptico, con el objetivo de 40X; se contaron los glóbulos rojos contenidos en cinco de los 25 cuadros que conforman el cuadrante de la cámara y posteriormente se realizó el cálculo de estos (Hesser, 1960; Noro y Wittwer, 2012).

El conteo de glóbulos blancos también se realizó mediante el uso de la cámara de Neubauer, siguiendo la misma metodología antes descrita, pero utilizando como diluyente la solución de Turk para leucocitos, que hemoliza los eritrocitos y cuyo colorante tiñe los leucocitos.

Siguiendo el mismo protocolo se determinó la concentración de hemoglobina corpuscular media (CH), hemoglobina corpuscular media (HC) y volumen corpuscular medio de eritrocitos (VC), para lo que se usaron las siguientes formulas:

$$\text{Concentración de hemoglobina corpuscular media } CH = \frac{HG \times 100}{HT}$$

$$\text{Hemoglobina corpuscular media } HC = \frac{HG \times 100}{GR}$$

$$\text{Volumen corpuscular medio de eritrocitos } VC = \frac{HT \times 100}{GR}$$

5.5. Caracterización física y análisis parasitológico externo

Para esta evaluación, se ocuparon los mismos peces que se muestrearon para el análisis hematológico, los cuales se sacrificaron en la granja mediante la introducción de una aguja de disección directamente en la cabeza de acuerdo a la técnica recomendada por Salgado (2009).

La caracterización física de los peces se realizó mediante observación directa de las alteraciones macroscópicas en piel, alteración del color, aletas deshilachadas, ojos y branquias (Salgado, 2009). Posteriormente se cortaron las aletas y branquias de los peces y se introdujeron en frascos para muestras de 100 ml con una solución de formol al 4% y se llevaron al laboratorio de acuicultura de la Universidad del Papaloapan para su análisis. Para el estudio parasitológico se observaron las muestras de branquias y aletas con un microscopio estereoscópico a un aumento de 20x, contabilizando los parásitos encontrados por pez y el número de peces infectados de acuerdo a la técnica propuesta por Paperna (1996). Además de las muestras de branquias y aletas, se realizaron frotis del mucus por duplicado de 15 peces por tratamiento, los cuales se dejaron

secar para su posterior análisis en el laboratorio Químico Biológico de la Universidad del Papaloapan.

5.6. Mortalidad y Sobrevivencia

Se registró la mortalidad diaria en todos los grupos y al final del experimento se contabilizó el total de mortalidad acumulada durante los 30 días en cada tratamiento. Al momento de la cosecha se evaluó el porcentaje de sobrevivencia en cada tratamiento, tomando la cantidad de peces supervivientes entre la población inicial por 100, para lo que se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Sobrevivencia. } SV (\%) = \left(\frac{\text{Número inicial de peces} - \text{Número de peces muertos}}{\text{numero inicial de peces}} \right) \times 100$$

5.7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron utilizando el programa Minitab versión 19.0 para determinar si existen diferencias significativas en las variables evaluadas entre los tratamientos y el grupo testigo, mediante un análisis de varianza de una vía. En los casos donde se observaron diferencias significativas se utilizó la prueba *a posteriori* de Tukey a un nivel de confianza del 95%.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Calidad del agua

La temperatura del agua presentó un promedio de 22,9 ° C, con una temperatura mínima de 20,8 °C y una máxima de 25° C. El rango de temperatura adecuado para el crecimiento óptimo de la tilapia es de 25 a 27 °C, mientras que el pH ideal oscila entre 6 y 9 (DeWalle *et al.*, 2011). Los resultados promedio de dichas mediciones se muestran en el Cuadro 2, todos los parámetros se encontraron dentro de los límites deseables para el cultivo de tilapia (El-Sayed, 2020).

Cuadro 2. Parámetros de calidad del agua en sitio experimental.

Parámetros	Promedio ± desviación estándar
Temperatura	22.9 ° C
Oxígeno disuelto	5.13 ± 0.97
Amonio	0.24 ± 0.17
pH	7.88 ± 0.22
Fosfato	0.15 ± 0.13
Nitrato	1.38 ± 0.94
Cloro	0.48 ± 0.13

6.2. Evaluación de crecimiento

En la biometría 0, se obtuvo que el peso promedio en general de los peces implicados en el experimento fue de 117.53 ± 21.17 g y una longitud total de 6.5 ± 1.2 cm.

Los resultados de los parámetros de crecimiento como son longitud total (LT), peso húmedo (PH), factor de condición (FC), tasa de crecimiento porcentual (TC) y ganancia de peso (GP) al día 15 se muestran en el Cuadro 3.

Al día 15 de tratamiento, solo los peces del grupo 2 (Zn+Mn) tuvieron mayor ganancia de peso ($P < 0.05$), en comparación del grupo testigo y los demás tratamientos, así también en cuanto a la tasa de crecimiento porcentual, se obtuvo diferencia significativa entre grupos, presentando un resultado mayor los peces del grupo 2, mientras que los demás parámetros no presentaron

diferencias. Lo anterior puede deberse a que aún era muy poco tiempo para observar efectos del Zn, ya que los tiempos de tratamiento con este mineral, utilizados en otras investigaciones con tilapia, han sido de seis semanas hasta 80 días (Rohani *et al.*, 2022; El-Sayed *et al.*, 2023).

Cuadro 3. Indicadores de crecimiento de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, suplementadas con minerales al día 15 de tratamiento. n= 45. Promedio \pm desviación estándar.

Variables al día 15	TRATAMIENTOS			
	Testigo	Zn+Mn	Zn+Cr	Zn+Cu
Peso húmedo (g)	193.9 \pm 29.4 ^a	207.4 \pm 32.0 ^a	205.8 \pm 30.0 ^a	200.8 \pm 32.1 ^a
Longitud total (cm)	20.5 \pm 1.2 ^a	20.9 \pm 1.3 ^a	20.9 \pm 1.1 ^a	21.0 \pm 0.9 ^a
Ganancia de peso (g)	75.9 \pm 4.8 ^a	92.4 \pm 5.5 ^b	87.3 \pm 5.5 ^a	82.1 \pm 2.9 ^a
Factor de condición (g/cm ³)	2.2 \pm 0.2 ^a	2.25 \pm 0.2 ^a	2.2 \pm 0.22 ^a	2.2 \pm 0.2 ^a
Tasa de crecimiento (%)	64.5 \pm 3.8 ^{ac}	80.55 \pm 1.9 ^b	74.4 \pm 8.8 ^{bc}	69.42 \pm 5.5 ^c

Al final del tratamiento (Cuadro 4), los tres grupos tratados con Zn tuvieron mayor ganancia de peso ($P < 0.05$), en comparación con el grupo testigo y nuevamente los peces del grupo Zn+Mn fueron más pesados ($P < 0.05$) que los demás grupos, exceptuando al grupo Zn+Cr que también sobresalió en peso.

Cuadro 4. Indicadores de crecimiento de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, suplementadas o no, con minerales durante 30 días. n= 45. Promedio \pm desviación estándar.

Variables al día 30	TRATAMIENTOS			
	Testigo	Zn+Mn	Zn+Cr	Zn+Cu
Peso húmedo				
(g)	240.15 \pm 26.9 ^a	281.68 \pm 25.7 ^b	267.41 \pm 33.1 ^{bc}	258.07 \pm 29.3 ^{ac}
Longitud total				
(cm)	23.09 \pm 0.68 ^a	23.03 \pm 0.96 ^a	22.90 \pm 0.91 ^a	21.91 \pm 1.06 ^a
Ganancia de peso (g)	45.91 \pm 3.30 ^a	74.26 \pm 2.94 ^b	61.65 \pm 7.62 ^c	57.23 \pm 2.63 ^c
Factor de condición (g/cm ³)	1.95 \pm 0.11 ^a	2.31 \pm 0.13 ^b	2.23 \pm 0.12 ^b	2.45 \pm 0.24 ^b
Tasa de crecimiento (%)	23.71 \pm 1.69 ^a	35.87 \pm 1.47 ^b	30.01 \pm 3.20 ^c	28.55 \pm 1.6 ^{bc}

La TC también fue superior para los tres grupos tratados con Zn en comparación del grupo testigo ($P < 0.05$), siendo las mejores tasas de crecimiento las de los grupos Zn+Mn y Zn+Cr (35.87 y 30.01 respectivamente) en comparación del grupo testigo (23.71 ± 1.69) y el grupo Zn+Cu (28.55 ± 0.6). En todas estas variables de crecimiento, el grupo Zn+Mn sobresale en comparación con los peces del grupo testigo, y en algunas, sobre los otros grupos con zinc, lo que indica que la combinación del zinc con el manganeso aportó mayores beneficios al crecimiento de estos animales. Otros estudios han mostrado efectos similares en los efectos positivos en el crecimiento de los peces cuando se suplementan con minerales orgánicos, por ejemplo, Kishawy y colaboradores (2020) encontraron que el suplementar alevines de tilapia con zinc orgánico, mejoró el peso final y la ganancia de peso de estos animales comparados con sus

congéneres sin suplementar; mientras en otro estudio (Inarto *et al.*, 2023), la suplementación con 20 y 40 mg kg⁻¹ de zinc fue favorable para las tilapias, que mostraron mejoras notables en crecimiento la retención de proteínas, la biomasa final y el consumo de alimento. Los efectos en la mejoría en el crecimiento de la tilapia del Nilo en este estudio quizá pueda explicarse por la mayor capacidad de absorción de nutrientes en el intestino, lo que permite que el alimento se utilice de manera más efectiva, ya que ha sido reportado que uno de los efectos del zinc está directamente relacionado con la morfología y el funcionamiento intestinal, observándose que la suplementación con zinc orgánico en el alimento aumenta significativamente el área de absorción intestinal (Inarto *et al.*, 2023). Por su parte, el manganeso también participa en el metabolismo proteico y energético, además de que favorece la mineralización ósea, participa en la defensa celular contra los radicales libres y la regulación metabólica (Lall y Kaushik, 2021). Se ha demostrado que la suplementación con manganeso mejora el crecimiento y la capacidad antioxidante en varias especies de peces (Tang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2023), además de que la tasa de crecimiento y la conversión alimenticia son influenciadas positivamente por los niveles de manganeso en la dieta (Nie *et al.*, 2008). Este mineral utilizado junto al zinc en el grupo 2, tuvo efectos aditivos en el crecimiento de los peces, posiblemente disminuyendo los efectos negativos de las especies reactivas de oxígeno y posiblemente también mejorando la capacidad digestiva y de absorción en el intestino de los peces (Lin *et al.*, 2008; Castañeda, 2020).

Por otro lado, y contrario al presente estudio, también se ha reportado que la inclusión del complejo zinc-aminoácido (171 µg/kg) durante 60 días no muestra efectos sobre el crecimiento y la tasa de supervivencia de la tilapia del Nilo (Do Carmo, 2005), mientras en otras especies, Shahpar y Johari (2019) reportan que el zinc orgánico (50 mg/kg) no mejora el crecimiento, ni la supervivencia, ni la composición corporal de larvas de trucha arco iris, y en carpa común, tampoco se encontraron diferencias significativas en el aumento de peso entre el grupo testigo y los peces que recibieron suplementación con zinc a una concentración de 25 y 50 mg/kg (Dekani *et al.*, 2019).

Posiblemente, la diferencia en los resultados, entre este estudio y los tres últimos mencionados, pueda deberse a factores como las diferentes dosis utilizadas, el uso de peces sexados y el tipo de estanque utilizado en aquellos trabajos.

En cuanto al factor de condición, fue superior ($P < 0.05$) en todos los grupos suplementados con minerales orgánicos, comparados con el grupo testigo sin suplementar. Este parámetro, el cual es preferible que sea superior a 1 en la tilapia y que supone una buena salud, e indica un crecimiento isométrico deseable (Jones *et al.*, 1999), da un indicio de que todas las dietas utilizadas en este estudio fueron adecuadas para el crecimiento de los peces de todos los tratamientos y que se encontraban en buenas condiciones y sanos, ya que incluso en el grupo testigo, fue superior a 1.

El rendimiento final de filete no difirió entre tratamientos ($p > 0.05$), observándose los siguientes valores en el cuadro 5.

Cuadro 5. Rendimiento del filete de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, suplementadas con minerales durante 30 días. $n = 45$. Promedio \pm desviación estándar.

Variables al día 30	TRATAMIENTOS			
	Testigo	Zn+Mn	Zn+Cr	Zn+Cu
Rendimiento del filete (%)	28.20 \pm 1.74	30.90 \pm 2.39	31.70 \pm 2.25	29.90 \pm 4.47

6.3. Parámetros hematológicos.

No hubo cambios significativos ($p > 0,05$) en los valores de hemoglobina (cuadro 7), proteína total del plasma, concentración de hemoglobina corpuscular media, hemoglobina corpuscular media, ni en el volumen corpuscular medio de glóbulos rojos, ($P < 0,05$) en los peces de los grupos suplementados con minerales orgánicos, ni en el grupo testigo, mostrando que, en este experimento, los minerales orgánicos, zinc, manganeso, cobre y cromo, no fueron capaces de favorecer la síntesis de esas proteínas o de afectar el tamaño de los GR, contrario

a lo reportado por otros autores, quienes informan que el zinc orgánico eleva significativamente la proteína sérica total, la albúmina y niveles de globulina, y que este aumento probablemente se deba a la estimulación de la síntesis de proteínas en el hígado (Feng *et al.*, 2010; Kishawy *et al.*, 2020). Esta discrepancia entre el presente estudio y los mencionados, puede ser el resultado de diferencias entre especies, dosis y tiempo de administración, y la composición de la dieta.

En el hematocrito, tampoco se presentaron diferencias estadísticas, sin embargo, se observó una tendencia a tener mayor hematocrito en los grupos Zn+Mn y Zn+Cr con respecto al grupo testigo y Zn+Cu. Un mayor hematocrito, indica mejor respuesta a diferentes factores causantes de estrés, como la deficiencia de oxígeno cuando se encuentran los peces a altas densidades (Hahn-Von-Hessberg *et al.*, 2011). Por otro lado, si hubo diferencias ($p < 0.05$) entre algunos grupos, en los conteos de glóbulos blancos y glóbulos rojos.

El número de glóbulos rojos de los peces del grupo Zn+Cr fue mayor ($p < 0.05$) que el de los grupos testigo y Zn+Cu, pero fue similar al grupo Zn+Mn. Lo que quiere decir que la combinación de Zn+Cr favorece la producción de estas células. Algunos estudios han demostrado que cuando se administra zinc orgánico y partículas de nano-Zn los peces muestran incrementos en el recuento de glóbulos rojos en comparación con los grupos suplementados con zinc inorgánico, además de mejorar los niveles de hemoglobina, y otros parámetros hematológicos en la tilapia del Nilo (Feng *et al.*, 2010; Kishawy *et al.*, 2020). Se ha demostrado que la presencia de zinc estimula la eritropoyesis en varias especies de peces, lo que respalda aún más el papel del zinc en la mejora de la producción de glóbulos rojos (Chen *et al.*, 2017).

En el conteo de glóbulos blancos, se obtuvo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el grupo Zn+Cu con respecto a los grupos testigo y Zn+Cr, siendo mayor el conteo para el grupo Zn+Cu, mismo que resultó sin diferencia ($p < 0.05$) al compararlo con el grupo suplementado con Zn+Mn, por lo que estos dos grupos

muestran un efecto positivo al incrementar la cantidad de este tipo de células relacionadas con las defensas inmunológicas de los peces.

Este resultado está de acuerdo con lo reportado por Kishawy *et al.* (2020), que encontraron que la suplementación con zinc orgánico en la tilapia incrementa el conteo de glóbulos blancos en tilapias en comparación con los peces suplementados con zinc inorgánico; estos resultados junto con los del presente estudio, sugieren que las fuentes orgánicas de zinc, como la Zn-metionina, pueden mejorar la cantidad de glóbulos blancos en la tilapia, aumentando potencialmente su función inmune. La influencia de los minerales orgánicos zinc, manganeso, cromo y cobre, en los índices hematológicos de los peces se resumen en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros hematológicos de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, al finalizar la suplementación con minerales, durante 30 días, n= 15. Promedio \pm desviación estándar.

VARIABLE	TRATAMIENTO			
	Testigo	Zn+Mn	Zn+Cr	Zn+Cu
Hematocrito (%)	21.7 \pm 3.4 ^a	22.36 \pm 3.0 ^a	24.0 \pm 3.8 ^a	21.7 \pm 3.8 ^a
Proteína Total del Plasma (g/dL)	4.2 \pm 0.8 ^a	3.9 \pm 0.5 ^a	4.1 \pm 0.5 ^a	4.0 \pm 0.7 ^a
Hemoglobina (HB)	9.6 \pm 0.8 ^a	9.95 \pm 1.4 ^a	9.2 \pm 1.3 ^a	10.07 \pm 1.1 ^a
Concentración de Hemoglobina Corpuscular Media (CH)	49.63 \pm 10.4 ^a	37.63 \pm 2.7 ^a	39.7 \pm 7.6 ^a	47.74 \pm 5.3 ^a
Hemoglobina Corpuscular Media (HC, g/dL)	6.4E-04 \pm 2.1E-04 ^a	4.8E-04 \pm 8.7E-05 ^a	5.3E-04 \pm 1.2E-04 ^a	6.4E-04 \pm 2.4E-04 ^a
Glóbulos Blancos (x1000, células/ μ L)	34.2 \pm 5.2 ^a	41.5 \pm 7.4 ^{ac}	30.2 \pm 8.9 ^{ab}	42.3 \pm 5.0 ^c
Glóbulos Rojos (x1000, células/ μ L)	1667.5 \pm 413.5 ^a	1980.0 \pm 237.1 ^{ab}	2153.3 \pm 477.7 ^b	1613.3 \pm 338.3 ^{ac}
Volumen Corpuscular Medio de Glóbulos Rojos (fL)	0.0012 \pm 9.8E-05 ^a	0.00099 \pm 0.00018 ^a	0.0013 \pm 0.00057 ^a	0.0013 \pm 0.00063 ^a

6.4. Caracterización física y análisis parasitológico

Al analizar las muestras de branquias, aletas y frotis tomadas de los peces de los diferentes tratamientos, se obtuvo que el 100% de los peces dieron positivo a la presencia de parásitos al encontrarse al menos un tipo en alguna de las muestras de cada pez, sin importar el tratamiento. De los parásitos encontrados, se determinó que corresponden a los géneros *Cichlidogyrus*, *Trichodina* y *Ergasilus* al coincidir su morfología con la reportada para estos géneros por diferentes autores (Wang *et al.*, 2020; Zago *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022). Los sitios de infestación para *Cichlidogyrus* fueron los filamentos branquiales, para *Ergasilus* los filamentos branquiales y aletas mientras que *Trichodina* se identificaron en los frotis tomados del mucus colectado de escamas y aletas.

Con los datos obtenidos se calculó la prevalencia e intensidad parasitaria para cada uno de los tratamientos de manera general y por cada tipo de parásito. Se obtuvo un 100% de manera general y a su vez una prevalencia del 100% en cada uno de los tratamientos y el grupo testigo para los parásitos del género *Cichlidogyrus* y *Trichodina*, por lo que no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$).

La abundancia de parásitos del género *Cichlidogyrus* (cuadro 7), fue diferente ($P < 0.05$) entre el grupo testigo y cada uno de los tratamientos, sin embargo, entre tratamientos no se obtuvo diferencias significativas ($P > 0.05$). Aun cuando la prevalencia parasitaria fue del 100% para cada uno de los grupos, la abundancia de parásitos *Cichlidogyrus* disminuyó significativamente en cada uno de los tratamientos con respecto al grupo testigo.

Cuadro 7. Abundancia de *Cichlidogyrus* en tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, n= 15.

Parásitos encontrados	TRATAMIENTOS			
	Control	Zn+Mn	Zn+Cr	Zn+Cu
<i>Cichlidogyrus spp.</i>	27.6±3.2 ^a	19.33±4.2 ^b	18.6±3.6 ^b	20.4±5.1 ^b

La presencia de estos parásitos pueden tener un efecto negativo en los peces, dado que los parásitos *Trichodin* pueden causar enfermedades como la tricodiniasis y como consecuencia alta mortalidad, así también, los monogeneos ocasionan lesiones físicas como fusión de las lamelas branquiales, hemorragias, inflamación é hiperplasia en piel, branquias, aletas, escamas y ojos, provocando en las tilapias estrés, lento crecimiento y altas mortalidades o bien, pueden ser vectores de otras enfermedades causadas por bacterias, virus u hongos oportunistas (Timi y Poulin, 2020; Osuna-Cabanilla *et al.*, 2022). Si bien la tilapia es una especie muy resistente, se han registrado brotes de enfermedades parasitarias en el territorio mexicano, sin embargo la información disponible a este respecto es limitada, no obstante, en diferentes estudios realizados en tilapia, se ha observado la presencia de parásitos tricodinas y monogeneos, principalmente en el sur de México en los estados de Chiapas, Guerrero y Oaxaca, donde se han realizado estudios en diferentes regiones, incluyendo la región del Papaloapan en diferentes sistemas de cultivo en estanques y jaulas flotantes bajo condiciones similares a las del presente estudio, en el que coinciden los parásitos encontrados con los mayormente reportados para la región (Osuna-Cabanilla *et al.*, 2022), destacando principalmente la presencia de monogeneos, de los cuales se han reportado diferentes especies en la región (salgado-maldonado y Rubio-Godoy, 2014) y específicamente en el embalse de la presa Miguel de la Madrid (Gutiérrez *et al.*, 2017), cuyo cuerpo de agua se encuentra unido al embalse de la presa Miguel Alemán.

Al observar los peces, se notó una buena apariencia física y con mayor mucosidad en los que corresponden a cada uno de los tratamientos, por lo que se puede atribuir este efecto al zinc, dado que en cada uno de los tratamientos se usó este mineral a la misma concentración. Por otro lado, en los peces del grupo testigo se observaron aletas y filamentos branquiales lesionados y con menos mucosidad, siendo más susceptibles a infecciones por parásitos, hongos y bacterias, dado que el mocus es una barrera de defensa de los peces (Piera, 2022).

6.5. Mortalidad y sobrevivencia.

La mortalidad acumulada a los 15 y 30 días del experimento se muestra en la Figura 4. En los primeros 15 días de tratamiento la mortalidad fue baja, el primer caso ocurrió el día cinco, con un total de cinco incidencias en el experimento. sin embargo, en los últimos 15 días del experimento se incrementó considerablemente, siendo mayor en el grupo testigo con respecto a los demás tratamientos ($P < 0.05$).

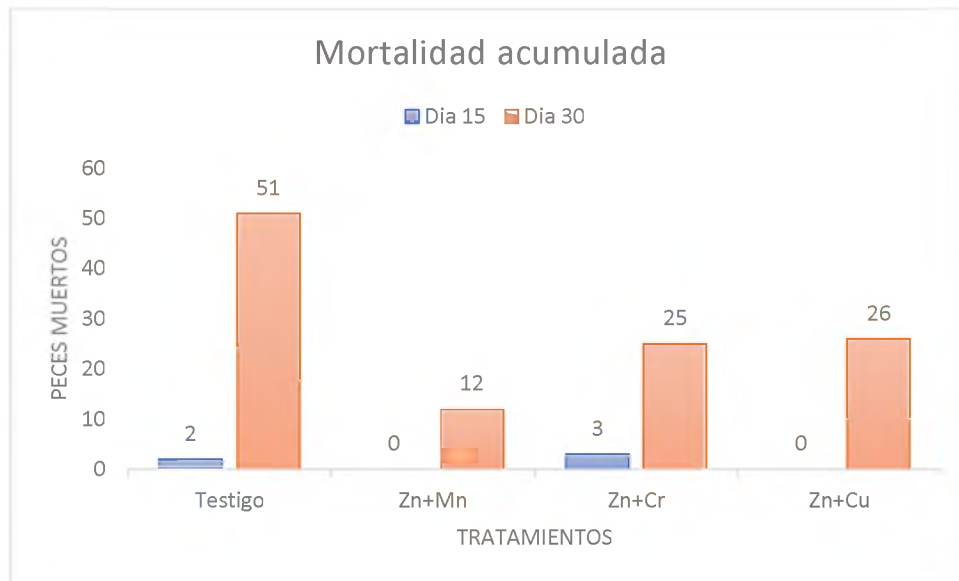


Figura 4. Mortalidad acumulada de tilapia del Nilo cultivada en el embalse de la presa Miguel Alemán suplementada con minerales a los días 15 y 30 de suplementación.

El porcentaje de mortalidad acumulada al final de los 30 días de tratamiento, fue superior ($P < 0.05$) en el grupo testigo (11.8%) comparada con la de los demás tratamientos (Zn+Mn 2.7%, Zn+Cr 6.2%, Zn+Cu 5.8%). El incremento de la mortalidad en todos los grupos, se dio posterior a la primera biometría, lo que pudo deberse al estrés al que se sometieron mediante su manipulación, pero se estabilizó unos días después en cada tratamiento, excepto en el grupo testigo. También se observa que en el grupo de peces tratado con Zn/Mn, la mortalidad se detuvo cinco días después de iniciada, y se mantuvo baja durante el resto del experimento. Esto puede deberse a los efectos directos y aditivos, de estos dos minerales, ya que ambos participan en la defensa celular contra los radicales

libres que se generan durante situaciones de estrés como el manejo (Castañeda, 2020; Dawood, et al., 2022). Estos minerales contribuyen a las funciones normales del sistema inmunológico de los peces y desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de la integridad de la membrana y en funcionamiento de células inflamatorias (Evans y Halliwell, 2001; Maret, 2017). Otros factores ambientales y biológicos, también pudieron provocar la mortalidad ya que, se ha reportado que, en conjunto, generan vulnerabilidad en los peces, ocasionando hasta más del 40% de mortalidades en peces cultivados (Caviedes y Pianeta., 2017). En un trabajo donde se caracterizaron los patrones de salud y producción de la tilapia del Nilo en jaulas flotantes (Roriz et al., 2017), en un embalse tropical en Brasil, las mayores pérdidas de alevines se dan durante la estación fría. Según la percepción de los productores, las pérdidas por mortalidad en la engorda oscilaron entre el 3 y el 33 %, con un valor medio del 10 %. Mientras en otros estudios (Ayroza et al., 2006; Sabbag et al., 2007) también en embalses de Brasil, estimaron una tasa de mortalidad del 15% en la producción de tilapia en jaulas flotantes.

La sobrevivencia se benefició de la suplementación mineral, un mayor porcentaje de sobrevivencia se observó ($P < 0.05$) en todos los grupos tratados con minerales orgánicos en comparación con el grupo testigo (cuadro 8). Una vez más el grupo Zn+Mn destaca por un mayor porcentaje de sobrevivencia, lo cual reafirma los efectos positivos de esta combinación de zinc y manganeso sobre el crecimiento, sobrevivencia y resistencia a enfermedades, tal como se reporta en un estudio realizado con bagre *Pangasius*, en donde la suplementación dietética con minerales orgánicos (zinc, selenio y cromo) mejoró la tasa de supervivencia y la resistencia a la bacteria *Edwardsiella ictaluri* (Vo et al., 2020).

Cuadro 8. sobrevivencia en tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas flotantes en la presa Miguel Alemán, San Pedro Ixcatlán, n= 15.

Variable	TRATAMIENTOS			
	Control	Zn+Mn	Zn+Cr	Zn+Cu
Sobrevivencia (%)	88.20 ± 0.40 ^a	97.30 ± 1.20 ^b	93.80 ± 2.50 ^b	94.20 ± 3.80 ^b

La sobrevivencia observada en las tilapias tratadas con minerales orgánicos pudiera estar relacionada, con la interacción entre estos minerales y enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD). Se ha reportado que, en tilapias, la suplementación con minerales orgánicos incrementa la actividad de SOD en condiciones de estrés por calor (Yang *et al.*, 2022; Inarto *et al.*, 2023).

7. CONCLUSIONES

La combinación de zinc y manganeso orgánicos mejora, el crecimiento y la ganancia de peso en las tilapias cultivadas en jaulas flotantes, lo que se atribuye a su mayor biodisponibilidad y a los efectos aditivos entre estos dos minerales que mejoran la inmunidad, el metabolismo proteico y energético.

La combinación de zinc con manganeso y zinc con cromo de fuentes orgánicas incrementaron el número de glóbulos rojos y glóbulos blancos en las tilapias, probablemente mediante mecanismos que estimulan la proliferación celular y la inhibición de la apoptosis.

La suplementación con minerales orgánicos combinados zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre, presentan un efecto positivo en la disminución de la intensidad parasitaria en las tilapias cultivadas en jaulas flotantes, probablemente por los efectos estimulantes de las defensas específicas y no específicas como el mucus en la piel de los peces.

Los géneros parasitarios encontrados en las tilapias del Nilo en jaulas flotantes en el embalse de la presa Miguel Alemán, coinciden con los anteriormente reportados en otros estudios de la región del Papaloapan.

La combinación de minerales orgánicos; zinc+manganeso, zinc+cromo y zinc+cobre influye positivamente en la sobrevivencia de las tilapias cultivadas en jaulas flotantes debido a la importancia de los minerales en los procesos fisiológicos relacionados con el funcionamiento biológico, la salud e inmunidad.

El uso de minerales orgánicos en el cultivo de tilapias en jaula en la Presa Miguel Alemán, es una alternativa viable para prevenir las enfermedades, mejorar el crecimiento y disminuir la mortalidad, mejorando la sostenibilidad de esta práctica acuícola y la economía de los productores en la región.

8. PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis del agua que permita conocer las concentraciones de minerales disponibles previo a algún trabajo de investigación en el que se suministre minerales, dado que pueden ser absorbidos de manera branquial.
- Comparar el uso de minerales orgánicos con fuentes inorgánicas y comparar el uso de cada mineral por separado.
- Probar la suplementación con minerales traza en la dieta de la tilapia del Nilo en diferentes etapas de cultivo, bajo condiciones controladas.

9. LITERATURA CITADA

- Abdel-F. M y El-Sayed. 2020. Intensive culture. In: Tilapia Culture (103-134 pp.) Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816509-6.00006-9>
- Alemayehu, T. A., Geremew, A., y Getahun, A. 2018. The role of functional feed additives in tilapia nutrition. *Fisheries and Aquaculture Journal*, 9(2).
- Allison, E. H. 2011 Aquaculture, fisheries, poverty and food security (Working Paper 2011–65). WorldFish Center, Penang, Malaysia, pp 6-33.
- Andreini, C., Bertini, I. 2013. Zinc-Binding Proteins, Abundance. In: Kretsinger, R.H., Uversky, V.N., Permyakov, E.A. (eds) Encyclopedia of Metalloproteins. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1533-6_180
- Apines-Amar, M. J. S., Satoh, S., Caipang, C. M. A., Kiron, V., Watanabe, T., y Aoki, T. 2004. Amino acid-chelate: a better source of Zn, Mn and Cu for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 240(1-4), 345-358.
- Asmah, R., Falconer, L., Telfer, T. C., Karikari, A. Y., Al Wahaibi, M., Xia, I. F., y Ross, L. G. 2021. Waterbody scale assessment using spatial models to identify suitable locations for cage aquaculture in large lake systems: A case study in Volta Lake, Ghana. *Aquaculture Research*, 52(8), 3854-3870.
- Ashmead, H. 2012. *Amino Acid Chelation in Human and Animal Nutrition*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Assefa, A., y Abunna, F. 2018. Maintenance of fish health in aquaculture: review of epidemiological approaches for prevention and control of infectious disease of fish. *Veterinary medicine international*.
- Avila, E. J. F., Guerrero, R. M. M., y Serna, F. N. M. 2017. Estrategias para la prevención y control de las enfermedades parasitarias de la tilapia. *Acta Agrícola y pecuaria*, 3(2):25-31.
- Bagchi, D., Stohs, S. J., Downs, B. W., Bagchi, M., y Preuss, H. G. 2002. Cytotoxicity and oxidative mechanisms of different forms of chromium. *Toxicology*, 180(1), 5-22.

- Bagheri, S., Gholamhosseini, A., y Banaee, M. 2023. Investigation of Different Nutritional Effects of Dietary Chromium in Fish: A Literature Review. *Biological Trace Element Research*, 201(5), 2546-2554.
- Bakshi, A., y Panigrahi, A. K. 2018. A comprehensive review on chromium induced alterations in fresh water fishes. *Toxicology reports*, 5, 440-447.
- Baños-Baños, J. J., Bojórquez-Sánchez, C., Bergés-Tiznado, M. E., Páez-Osuna, F., y Torres-Rojas, Y. E. 2023. Concentración de oligoelementos metálicos (cobre y zinc) en músculo e hígado del cazón picudo del Atlántico (*Rhizoprionodon terraenovae*), capturado en el litoral de Campeche, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 94.
- Bautista, J. F. F., Vergara, R., y Suarez, A. 2017. Evaluación de una fórmula alimenticia para camarón de cultivo (*L. vannamei*) con inclusión de proteína vegetal a base de harina de soya. *Revista AquaTIC*, 1(44), 12-29.
- Beveridge, M.C. 2004. Cage aquaculture, third edition. Oxford, UK, Blackwell Publishing Ltd. 376 pp.
- Bondad-Reantaso, M. G., MacKinnon, B., Karunasagar, I., Fridman, S., Alday-Sanz, V., Brun, E., y Caputo, A. 2023. Review of alternatives to antibiotic use in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*.
- Bosu A, Haidar MI, Flura, Rahman MA, Khan MH and Mahmud Y. 2016. Risk factors associated with disease of tilapia (*Oreochromis niloticus*) in cage culture systems. *International Journal of Natural and Social Sciences*, 3(4):68-74.
- Byrne, L., y Murphy, R. A. 2022. Relative Bioavailability of Trace Minerals in Production Animal Nutrition: A Review. *Animals*, 12(15):1981.
- Caetano-Silva, M. E., Netto, F. M., Bertoldo-Pacheco, M. T., Alegría, A., y Cilla, A. 2021. Peptide-metal complexes: Obtention and role in increasing bioavailability and decreasing the pro-oxidant effect of minerals. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(9), 1470-1489.
- Castañeda, Á. 2020. Metaloenzimas artificiales: tipos y ventajas frente a las metaloenzimas convencionales. *Revista de Química*, 34(1-2), 28-37.

- Campos-Granados, C. 2015. El impacto de los micronutrientes en la inmunidad de los animales. *Nutrición animal tropical*, 9(1), 1-23.
- Caputo, A., Bondad-Reantaso, M. G., Karunasagar, I., Hao, B., Gaunt, P., Verner-Jeffreys, D., y Dorado-Garcia, A. 2023. Antimicrobial resistance in aquaculture: A global analysis of literature and national action plans. *Reviews in Aquaculture*, 15(2), 568-578.
- Chen, Y. H., Shiu, J. R., Ho, C. L., & Jeng, S. S. 2017. Zinc as a signal to stimulate red blood cell formation in fish. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(1), 138.
- Cruz, M. C., Ortega, M. B., Mosalve, E. R., Mihi, D. R., y Rodríguez, E. S. 2015. Análisis del contenido de metales en aguas, sedimentos y peces en la Cuenca del Río Santiago, provincia de Esmeraldas, Ecuador. *Investigación y Saberes*, 4(2), 32-42.
- Dekani, L., Johari, S. A., y Joo, H. S. 2019. Comparative toxicity of organic, inorganic and nanoparticulate zinc following dietary exposure to common carp (*Cyprinus carpio*). *Science of the total environment*, 656, 1191-1198.
- Davis, D. A., 2015. Feed and feeding practices in Aquaculture. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition Number 287. pp. 71.
- Dawood, M. 2021 Nutritional immunity of fish intestines: important insights for sustainable aquaculture. *Reviews in Aquaculture* 13(1):642–663.
- Dawood, M., Alagawany, M., y Sewilam, H. 2021. The Role of Zinc Microelement in Aquaculture: a Review. *Biological trace element research*, 200(8):3841–3853. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02958-x>.
- Debnath, S. C., McMurtrie, J., Temperton, B., Delamare-Deboutteville, J., Mohan, C. V., y Tyler, C. R. 2023. Tilapia aquaculture, emerging diseases, and the roles of the skin microbiomes in health and disease. *Aquaculture International*, 1-32.
- De la Guardia Peña, O., Ustáriz García, C., García García, M. D. L. Á., y Morera Barrios, L. 2011. Algunas aplicaciones clínicas del zinc y su acción sobre

- el sistema inmune. *Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Hemoterapia*, 27(4), 367-381.
- Devic, E., Leschen, W., Murray, F. y Little, DC 2018. Desempeño del crecimiento, utilización del alimento y composición corporal de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) lactante avanzada alimentadas con dietas que contienen harina de larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*). *Nutrición acuícola*, 24 (1), 416-423.
- Domínguez, D., Rimoldi, S., Robaina, L. E., Torrecillas, S., Terova, G., Zamorano, M. J., e Izquierdo, M. 2017. Inorganic, organic, and encapsulated minerals in vegetable meal based diets for *Sparus aurata* (Linnaeus, 1758). *PeerJ*, 5, e3710.
- Dong, X. H., Guo, Y. X., Ye, J. D., Song, W. D., Huang, X. H., y Wang, H. 2010. Apparent digestibility of selected feed ingredients in diets for juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*. *Aquaculture Research*, 41(9), 1356-1364.
- E Sá, M. V. D. C., Pezzato, L. E., Lima, M. M. B. F., y de Magalhães Padilha, P. 2004. Optimum zinc supplementation level in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* juveniles diets. *Aquaculture*, 238(1-4):385-401.
- Eid, A. E., y Ghonim, S. I. (1994). Dietary zinc requirement of fingerling *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 119(2-3), 259-264.
- El-Erian, M. A., Ibrahim, M. S., Salem, S. M., Mohammady, E. Y., El-Haroun, E. R., y Hassaan, M. S. (2023). Evaluation of different copper sources in Nile tilapia diets: growth, body indices, hematological assay, plasma metabolites, immune, anti-oxidative ability, and intestinal morphometric measurements. *Biological Trace Element Research*, 1-12.
- El-Sayed, A. F. M., Figueiredo-Silva, C., Zeid, S. M., y Makled, S. O. 2023. Metal–amino acid complexes (Zn, Se, Cu, Fe, and Mn) enhance immune response, antioxidant capacity, liver function enzymes, and expression of cytokine genes in Nile Tilapia reared under field conditions. *Journal of Aquatic Animal Health*, 35(4), 248-262.

- Evans, P., y Halliwell, B. 2001. Micronutrients: oxidant/antioxidant status. *British journal of nutrition*, 85(S2), S67-S74.
- FAO. 2018. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Disponible en: <http://cepesca.es/wp-content/uploads/2018/07/Informe-SOFIA-2018-espa%C3%B1ol.pdf>
- Farhaduzzaman AM, Hanif A, Khan S, Osman MH, Shovon NH y Rahman MK, 2020 Perfect Stocking Density Ensures Best Production and Economic Returns in Floating Cage Aquaculture System. *Journal of Aquaculture Research y Development* 11: 9.
- Feng, J. W. Q. M., Ma, W. Q., Niu, H. H., Wu, X. M., Wang, Y., y Feng, J. 2010. Effects of zinc glycine chelate on growth, hematological, and immunological characteristics in broilers. *Biological trace element research*, 133, 203-211.
- Feoktistova V., L., y Clark F., Y. 2018. El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana. *Medisur*, 16(4), 579-587.
- Ferguson, J. A., Watral, V., Schwindt, A. R., y Kent, M. L. 2007. Spores of two fish microsporidia (*Pseudoloma neurophilia* and *Glugea anomala*) are highly resistant to chlorine. *Diseases of aquatic organisms*, 76(3):205-214.
- Fraker, P. 2000. Zinc in the immune system. *Journal of Nutrition*. 130: 1399S–1406S.
- Francis, G., Makkar, H. P., y Becker, K. 2001. Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish. *Aquaculture*, 199(3-4), 197-227.
- Fukada, T., Yamasaki, S., Nishida, K., Murakami, M., y Hirano, T. 2011. Zinc homeostasis and signaling in health and diseases: Zinc signaling. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 16, 1123-1134.
- Funge-Smith, S. y Phillips, M.J. 2001. Aquaculture systems and species. In Subasinghe, R. P., Bueno, P., Phillips, M. J., Hough, C., McGladdery, S. E. y Arthur, J. R., eds. *Aquaculture in the Third Millennium. Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in the Third Millennium*,

- Bangkok, Thailand, 20-25 February 2000. pp. 129-135. NACA, Bangkok and FAO, Rome.
- Furuya, W. M., Cruz, T. P. D., y Gatlin III, D. M. 2023. Amino acid requirements for Nile tilapia: An update. *Animals*, 13(5), 900.
- Garzón, J. S. V., y Gutiérrez-Espinosa, M. C. (2019). Aspectos nutricionales de peces ornamentales de agua dulce. *Revista politécnica*, 15(30), 82-93.
- Grosell, M. 2010 Copper, In: Martin G., A. P. F., Colin, J. B. (ed.) 2011 Fish Physiology, pp. 53-133. Academic Press. Volumen 31, Part A.
- Guerrero, J. M. C., y Pelcastre, A. J. 2021. Hacia el desarrollo sostenible de la pesca y la acuicultura en México: marcos normativos, organización socioeconómica y desafíos. *Cuadernos Geográficos*, 60(3):6-28.
- Gutiérrez-Cubillas E., López-Jiménez S., García-Magaña L., Antonio-Estrada C. 2017. Parásitos de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*) cultivada en jaulas flotantes, San Lucas Ojitlán, Oaxaca, México. En: Producción y Manejo de los Recursos Acuáticos en el Trópico. 1ª ed. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México: 124-133.
- Haenen, O. L., Dong, H. T., Hoai, T. D., Crumlish, M., Karunasagar, I., Barkham, T., y Bondad-Reantaso, M. G. (2023). Bacterial diseases of tilapia, their zoonotic potential and risk of antimicrobial resistance. *Reviews in Aquaculture*, 15, 154-185.
- Hahn-Von-Hessberg, C. M., Grajales-Quintero, A., y Gutiérrez-Jaramillo, A. V. 2011. Parámetros hematológicos de Tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus 1757) con peso entre 250 g y 350 g, en el Centro Experimental Piscícola de la Universidad de Caldas. *Veterinaria y zootecnia*, 5(1), 47-61.
- Halver J., E. 2002. The vitamins. In: Halver JE, Hardy RW, editors. Fish Nutrition, Third Edition. London: Academic Press. 61–141.
- Halwart, M. y Moehl, J.F. (eds.) 2006. FAO Regional Technical Expert Workshop on Cage Culture in Africa. Entebbe, Uganda, 20-23 October 2004. FAO Fisheries Proceedings. No. 6. Rome, FAO. pp. 113. <https://www.fao.org/3/a0833e/a0833e00.htm>

- Hernández M., M. G. y Fernández G., M. L. 2005. Gnatostomiasis: una enfermedad creciente en viajeros. *Médica Clínica*, 125(5):40-42.
- Hogstrand, C. 2011. Zinc. In Wood C. M., Farrell A. P., y Brauner C. J. (Eds.), *Fish Physiology* (pp. 135–200). Academic Press. 10.1016/S1546-5098(11)31003-5.
- Inarto, H., Ekasari, J., Jusadi, D., Nasrullah, H., y Suprayudi, M. A. 2023. Dietary Supplementation of Organic Zn Improves Digestive Enzyme Activities, Antioxidant Response, and Growth Performance of Nile Tilapia *Oreochromis sp.* Research square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3159451/v1>.
- Indahsari M, Kismiyati K., Ulkhaq MF. (2019). IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 236 012108
- Jobling, M. J. H. Tidwell 2012, Aquaculture production systems, in James H. Tidwell (2012), *Aquaculture International* 21, 733–735. ISBN:9781118250105. Copyright. <https://doi.org/10.1007/s10499-012-9599-0>
- Karamzadeh, M., Yahyavi, M., Salarzadeh, AR y Nokhbe Zar, D. 2022. Effects of dietary selenium and zinc nanoparticles on growth performance, immune responses, and antioxidant enzymes activities of white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Iranian Journal of Fisheries Science*, 21 (5), 1125-1140.
- Kaliky, N. A. P. S. B., Setiawati, M., Carman, O., y Utomo, N. B. P. 2019. Effect of zinc (Zn) supplementation on quality and quantity of striped catfish *Pangasianodon hypophthalmus* sperm. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 18(1):46-53.
- Kambe, T., Tsuji, T., Hashimoto, A., y Itsumura, N. 2015. The physiological, biochemical, and molecular roles of zinc transporters in zinc homeostasis and metabolism. *Physiological reviews*. 95, 749–784 (2015).
- Kiron, V. 2012. Fish immune system and its nutritional modulation for preventive health care. *Animal Feed Science and Technology* 173(1-2): 111–133.

- Kratzer, H.F. 1986. Chelates In Nutrition (1st ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781351070508>
- Kucukbay, F. Z., Yazlak, H., Sahin, N. U. R. H. A. N., y Cakmak, M. N. 2006. Effects of dietary chromium picolinate supplementation on serum glucose, cholesterol and minerals of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture International*, 14, 259-266.
- Kumkhong, S., Marandel, L., Plagnes-Juan, E., Veron, V., Panserat, S., y Boonanuntanasarn, S. 2020. Early feeding with hyperglucidic diet during fry stage exerts long-term positive effects on nutrient metabolism and growth performance in adult tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Journal of Nutritional Science*, 9, e41.
- Lagler, K. F. 1978. Captura, muestreo y examen de peces. En: Métodos para la Evaluación de la Producción Pesquera en Aguas Dulces. (TB Bagenal.) pp. 7–47.
- Lall, S. P., 2000. Nutrition and health of fish. En: Cruz -Suárez, L.E., Ricque-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Olvera-Novoa, M.A. y Civera-Cerecedo, R., (Eds.). Avances en Nutrición Acuícola V. Memorias del V Simposium Internacional de Nutrición Acuícola. 19-22.
- Lall, S. P. 2002. The minerals. In: Halver, J. E., Hardy, R. W., editors. *Fish Nutrition*. 3rd ed. Elsevier/Academic Press; San Diego, CA, USA: pp. 259–308.
- Lall, S. P., y Kaushik, S. J. 2021. Nutrition and metabolism of minerals in fish. *Animals*, 11(09), 2711.
- Lall, S. P., y Lewis-McCrea, L. M. 2007. Role of nutrients in skeletal metabolism and pathology in fish—An overview. *Aquaculture*, 267(1-4), 3-19.
- Li, J.S., Li, J.L., Wu, T.T., 2007. The effects of copper, iron and zinc on digestive enzyme activity in the hybrid tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) × *Oreochromis aureus* (Steindachner). *Journal of Fish Biology* 71, 1788–1798.
- Li, M. R., y Huang, C. H. 2016. Effect of dietary zinc level on growth, enzyme activity and body trace elements of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* ×

- O. aureus, fed soya bean meal-based diets. *Aquaculture Nutrition*, 22(6), 1320-1327.
- Lin, Y. H., Lin, S. M., y Shiau, S. Y. 2008. Dietary manganese requirements of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*. *Aquaculture*, 284(1-4), 207-210.
- Liu, D., Li, L., Zhang, Q., y Yu, H. 2023. Effect of Dietary Manganese on the Growth Performance, Lipid Metabolism, and Antioxidant Capacity in the Post-Larval Coho Salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Animals*, 13(8), 1310.
- Liu, T., Wen, H., Jiang, M., Yuan, D., Gao, P., Zhao, Y., y Liu, W. 2010. Effect of dietary chromium picolinate on growth performance and blood parameters in grass carp fingerling, *Ctenopharyngodon idellus*. *Fish physiology and biochemistry*, 36, 565-572.
- Luna-Figueroa, J. 2017. Un menú diverso y nutritivo en la dieta de peces: "El alimento vivo". *Agro Productividad*, 10(9): 112-116.
- Maares, M., y Haase, H. 2016. Zinc and immunity: An essential interrelation. *Archives of biochemistry and Biophysics*, 611, 58-65.
- Machimbirike, V. I., Jansen, M. D., Senapin, S., Khunrae, P., Rattanaojpong, T., y Dong, H. T. 2019. Viral infections in tilapines: More than just tilapia lake virus. *Aquaculture*, 503, 508-518.
- Makwinja, R. y Geremew, A. 2020. Roles and requirements of trace elements in tilapia nutrition. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(3), 281-287.
- Marinho-Pereira, T., Junior, C. H. F., Rincón, L. M. G., Britto, E. N., Cavero, B. A. S., Aride, P. H. R., y de Oliveira, A. T. (2020). Tecnología biofloc: datos, estudios y experiencias para el desarrollo de la acuicultura latinoamericana. *Brazilian Journal of Development*, 6(2):7847-7862.
- Martínez-Cordero, F. J., Delgadillo, T.S., Sánchez-Zazueta, E., y Cai, J. 2021. Tilapia, Acuicultura en México - Diagnóstico con Enfoque Social y Ecológico. Desempeño económico. Circular de Pesca y Acuicultura de la FAO. N° 1219.
- Masser, M. P. 2012. Cage culture in freshwater and protected marine areas. *Aquaculture production systems*, 119-134.

- Mehrim, A. I. 2014. Physiological, biochemical and histometric responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) by dietary organic chromium (chromium picolinate) supplementation. *Journal of advanced research*, 5(3), 303-310.
- Melo J., H. D., de Paula, F. J., Menezes, J. M., de Araújo, J. A., Gonçalves S., J. E., Melo, H. V., Vieira, R. S., de Moraes Oliveira-Tintino, C. D., Tintino, S. R., Coutinho, D. M. y Teixeira, R. N. 2023. Impacts of the Residual Trace Metals of Aquaculture in Net Cages on the Quality of Sediment. *Life*, 13(2), 338.
- Mitra, S., Paul, S., Roy, S., Sutradhar, H., Bin Emran, T., Nainu, F., Khandaker M., U., Almalki, M., Wilairatana, P., Mubarak M., S. 2022. Exploring the Immune-Boosting Functions of Vitamins and Minerals as Nutritional Food Bioactive Compounds: A Comprehensive Review. *Molecules*. 27(2):555.
- Mohammady, E. Y., Soaudy, M. R., Abdel-Rahman, A., Abdel-Tawwab, M., y Hassaan, M. S. 2021. Comparative effects of dietary zinc forms on performance, immunity, and oxidative stress-related gene expression in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 532, 736006.
- Nguyen, L., Kubitzka, F., Salem, S. M., Hanson, T. R., y Davis, D. A. 2019. Comparison of organic and inorganic microminerals in all plant diets for Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 498, 297-304.
- Nie, J. Q., Dong, X. H., Tan, B. P., Chi, S. Y., Yang, Q. H., Liu, H. Y., y Shuang, Z. 2016. Effects of dietary manganese sources and levels on growth performance, relative manganese bioavailability, antioxidant activities and tissue mineral content of juvenile cobia (*Rachycentron canadum* L.). *Aquaculture research*, 47(5), 1402-1412.
- Obirikorang, K. A., Amisah, S., Fialor, S. C., y Skov, P. V. 2015. Digestibility and postprandial ammonia excretion in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing different oilseed by-products. *Aquaculture international*, 23, 1249-1260.
- OIE (Organización Mundial de Sanidad Animal) 2021. Código Sanitario para los Animales Acuáticos” Disponible en: <https://www.woah.org/es/que-hacemos/normas/codigos-y-manuales/acceso-en-linea-al-codigo->

- acuatico/, consultado en agosto de 2022. Plan Municipal de desarrollo (2008), San Pedro Ixcatlan. Disponible en: <https://finanzasoaxaca.gob.mx> › pdf › pmds.
- Okocha, R. C., Olatoye, I. O., y Adedeji, O. B. 2018. Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public health reviews*, 39(1), 1-22.
- Oliveira, M. S., Prestes, L., Adriano, E. A., y Tavares-Dias, M. 2022. Morphological and functional structure of two Ergasilidae parasites determine their microhabitat affinity on the gills of an Anostomidae fish from the Amazon. *Parasitology Research*, 121(8), 2295-2305.
- Ortega, E. R., Doria, M. C., Arenas, G. V., Dávila, F. S., Zare, E. G., y Ordoñez, E. S. 2020. Bioacumulación de metales pesados en tres especies de peces bentónicos del río Monzón, región Huánuco. *REBIOL*, 40(1), 69-78.
- Osuna-Cabanillas, J. M., Medina-Guerrero, R. M., Camacho-Zepeda, S., Morales-Serna, F. N., y Fajer-Ávila, E. J. 2022. Prevalencia e intensidad de tricodínidos y monogeneos en tilapia cultivada en el suroeste de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(2).
- Pan, Q., Bi, Y. Z., Yan, X. L., Pu, Y. Y., Zheng, C. 2002 Effect of organic chromium on carbohydrate utilization in hybrid tilapia *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*. *Acta Hydrobiologica Sinica* 26:393–399.
- Pauly, D. 1983. Algunos métodos simples para la evaluación de las poblaciones de peces tropicales (No. 234). Organización de Alimentos y Agricultura. (234):52 p.
- Paperna, I. 1996. Parasites, infections and diseases of fishes in Africa - An update CIFA Technical Paper. No.31. Rome, FAO. 220p.
- Paredes-Trujillo, A., Velázquez-Abunader, I., Torres-Irineo, E., Romero, D., Vidal-Martínez, V. M. 2016 Geographical distribution of protozoan and metazoan parasites of farmed Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) (Perciformes: Cichlidae) in Yucatán, México. *Parasites and Vectors* 9: 66.
- Pepi, M., y Focardi, S. 2021. Antibiotic-resistant bacteria in aquaculture and climate change: A challenge for health in the Mediterranean

- area. *International journal of environmental research and public health*, 18(11), 5723.
- Perea-Román, C., Garcés-Caicedo, Y. J., Muñoz-Arboleda, I. S., Hoyos-Concha, J. L., y Gómez-Peñaranda, J. A. 2018. Valoração econômica do uso ensilagem de recursos piscícolas na alimentação de *Oreochromis spp.* *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 16(1), 43-51.
- Phillips, M. J., Beveridge, M. C. M., y Ross, L. G. 1985. The environmental impact of salmonid cage culture on inland fisheries: present status and future trends. *Journal of fish Biology*, 27, 123-137.
- Piera, I. S. 2022. Caracterización funcional del mucus epidérmico en peces de interés productivo: metodología no invasiva de identificación de moléculas biomarcadoras y relación con el estado fisiológico. *Revista AquaTIC*, (58), 29-32.
- Pillay T., V. P. 1997. *Acuicultura: principios y prácticas*. Limusa. México, D. F. 699.
- Platas-Rosado, D. E. 2017. Importancia económica y social del sector acuícola en México. *Agro Productividad*, 10(2).
- Prabhu A., J., Schrama J., W., Kaushik S., J. 2016. Mineral requirements of fish: a systematic review. *Reviews in Aquaculture*, 8(2), 172-219.
- Rao, D. S., y Raghuramulu, N. 1999. Vitamin D3 and its metabolites have no role in calcium and phosphorus metabolism in *Tilapia mossambica*. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 45(1), 9-19.
- Rasul, M.G., y Majumdar, B.C. 2017. Abuse of Antibiotics in Aquaculture and it's Effects on Human, Aquatic Animal and Environment.
- Rohani, M. F., Bristy, A. A., Hasan, J., Hossain, M. K., y Shahjahan, M. 2022. Dietary zinc in association with vitamin E promotes growth performance of Nile tilapia. *Biological Trace Element Research*, 200(9), 4150-4159.
- Rojas, A., Wadsworth, S. 2007. A review of cage aquaculture: *Latin America and the Caribbean*. In *Cage Aquaculture: Regional Reviews and Global Overview*; FAO: Rome, Italy; pp. 77–100.

- Roriz, G. D., Delphino, M. K. D. V. C., Gardner, I. A., y Gonçalves, V. S. P. (2017). Characterization of tilapia farming in net cages at a tropical reservoir in Brazil. *Aquaculture Reports*, 6, 43-48.
- Rosas-Valdez, R., y Pérez-Ponce de León, G. 2008. Composición taxonómica de los helmintos parásitos de ictalúridos y heptaptéridos (Osteichthyes: Siluriformes) de México, con una hipótesis de homología biogeográfica primaria. *Revista mexicana de biodiversidad*, 79(2), 473-499.
- Rosas-Romero, R., y Covarrubias-Gómez, A. 2020. El papel del zinc en la salud humana. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 58(4), 477-485.
- Salgado, M. G. 2009. Manual de prácticas de parasitología con énfasis en helmintos parásitos de peces de agua dulce y otros animales silvestres de México. Programa de apoyo a proyectos para la innovación y mejoramiento de la enseñanza, PAPIME. Universidad Nacional Autónoma. México.
- Salgado-Maldonado, G., y Rubio-Godoy, M. 2014. Helmintos parásitos de peces de agua dulce introducidos. *Especies acuáticas invasoras en México*, 269-285.
- Saraiva, J. L., Rachinas-Lopes, P., y Arechavala-Lopez, P. 2022. Finding the “golden stocking density”: A balance between fish welfare and farmers' perspectives. *Frontiers in Veterinary Science*, 1099.
- Satoh, S., Tabata, K., Izume, K., Takeuchi, T. y Watanabe, T. 1987. Effect of dietary tricalcium phosphate on availability of zinc to rainbow trout. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53, 1199–1205.
- Savolainen, L. C., y Gatlin III, D. M. 2010. Evaluation of sulfur amino acid and zinc supplements to soybean-meal-based diets for hybrid striped bass. *Aquaculture*, 307(3-4), 260-265.
- Scott M. E., Koski K. G. 2000. Zinc deficiency impairs immune responses against parasitic nematode infections at intestinal and systemic sites. *Journal of nutrition*. 130(5S Suppl):1412S-20S.

- Schar, D., Klein, E. Y., Laxminarayan, R., Gilbert, M., y Van Boeckel, T. P. 2020. Global trends in antimicrobial use in aquaculture. *Scientific reports*, 10(1), 21878.
- Shahpar, Z., y Johari, S. A. 2019. Effects of dietary organic, inorganic, and nanoparticulate zinc on rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* larvae. *Biological Trace Element Research*, 190, 535-540.
- Shiau, S. Y., Lin, S. F., 1993 Effect of supplemental dietary chromium and vanadium on the utilization of different carbohydrates in tilapia, *Oreochromis niloticus* x *O. aureus*. *Aquaculture* 110:321–330.
- Shiau, S. Y., y Ning, Y. C. 2003. Estimation of dietary copper requirements of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* 5 *O. aureus*. *Animal Science*, 77(2), 287-292.
- Shiau, S. Y., y Lin, Y. H. 2006. Vitamin requirements of tilapia—A Review. *Avances en Nutrición Acuicola*. En: Cruz S., L. E., Ricque M., M., Tapia S., Nieto L., M., Villarreal C., D., Puello C., A. y García O., A. *Avances en Nutrición Acuicola .VIII Simposium Internacional de Nutrición Acuicola*. 15 - 17 noviembre. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México. ISBN 970-694-333-5. 129.
- Shiau, S.-Y., y Lin, Y.-H. 2019. Vitamin Requirements of Tilapia – A Review. *Avances En Nutrición Acuicola*. Recuperado a partir de: <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/165>
- Shinn, AP, Avenant-Oldewage, A., Bondad-Reantaso, MG, Cruz-Laufer, AJ, García-Vásquez, A., Hernández-Orts, JS, y Deveney, MR 2023. Una revisión global de los parásitos problemáticos y patógenos de la tilapia cultivada. *Reseñas en Acuicultura*, 15, 92-153.
- Shoemaker, C. A., Evans, J. J., y Klesius, P. H. 2000. Density and dose: factors affecting mortality of *Streptococcus iniae* infected tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 188(3-4), 229-235.
- Siddiqui, A. Q., Howlader, M. S., y Adam, A. A. 1988. Effects of dietary protein levels on growth, feed conversion and protein utilization in fry and young Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 70(1-2), 63-73.

- Sitjà-Bobadilla, A., Gil-Solsona, R., Estensoro, I., Piazzon, MC, Martos-Sitcha, JA, Picard-Sánchez, A. y Pérez-Sánchez, J. 2019. La interrupción de la integridad y la permeabilidad intestinal contribuye a la enteritis en un modelo de parásito de peces: una historia contada a partir de la metabolómica del suero. *Parásitos y vectores*, 12, 1-18.
- Stentiford, G. D., Sritunyaluksana, K., Flegel, T. W., Williams, B. A., Withyachumnarnkul, B., Itsathitphaisarn, O., y Bass, D. 2017. New paradigms to help solve the global aquaculture disease crisis. *PLoS pathogens*, 13(2), e1006160.
- Tacon, A.G.J. and Halwart, M. 2007. Cage aquaculture: a global overview. In M. Halwart, D. Soto and J.R. Arthur (eds). *Cage aquaculture – Regional reviews and global overview*, pp. 1–16. FAO Fisheries Technical Paper. No. 498. Rome, FAO. 2007. pp. 3-16.
- Tang, L., Huang, K., Xie, J., Yu, D., Sun, L., Huang, Q., y Bi, Y. 2017. Dietary copper affects antioxidant and immune activity in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*). *Aquaculture Nutrition*, 23(5), 1003-1015.
- Tang, R. J., Feng, L., Jiang, W. D., Liu, Y., Kuang, S. Y., Jiang, J., y Zhou, X. Q. 2016. Growth, digestive and absorptive abilities and antioxidative capacity in the hepatopancreas and intestine of young grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* Val.) fed graded levels of dietary manganese. *Aquaculture research*, 47(6), 1917-1931.
- Timi, J. T., y Poulin, R. 2020. Why ignoring parasites in fish ecology is a mistake. *International Journal for Parasitology*, 50(10-11), 755-761.
- Torres-Novoa, D. M., y Hurtado-Nery, V. L. (2012). Requerimientos nutricionales para Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). *Orinoquia*, 16(1), 63-68.
- Trulls, H. 2022. Minerales mayoritarios y elementos traza en carne de pescado de agua dulce y salada. *COMPENDIO DE CIENCIAS VETERINARIAS*, 12(1), 32-42.

- Vargas, A., Blanco, Y., y Salazar-Lugo, R. 2012. Efecto del cobre y del cadmio sobre la respuesta inmune innata del pez *Colossoma macropomum*. *Revista de Toxicología*, 29(2), 90-94.
- Vo, B. T. T., Le, H. T., y Ho, D. K. 2020. Evaluation of dietary supplementation of organic minerals on survivability and feed efficiency in larval rearing of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *The Journal of Agriculture and Development* 19(5), 55-61.
- Wang, K. W., Takeuchi, T., y Watanabe, T. 1985. Effect of dietary protein levels on growth of *Tilapia nilotica*. *Bulletin of the Japanese Society for the Science of Fish.*, 51: 133-140.
- Wang, Z., Bourland, W. A., Zhou, T., Yang, H., Zhang, C., y Gu, Z. 2020. Morphological and molecular characterization of two Trichodina (Ciliophora, Peritrichia) species from freshwater fishes in China. *European Journal of Protistology*, 72, 125647.
- Watanabe, T. 1982. Lipid nutrition in fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 73(1), 3-15.
- Watanabe, W. O., Losordo, T. M., Fitzsimmons, K., y Hanley, F. 2002. Tilapia production systems in the Americas: technological advances, trends, and challenges. *Reviews in fisheries science*, 10(3-4), 465-498.
- Watanabe, T. J. A. F. S. 1988. Availability of minerals in fish meal to fish. *Asian Fish. Sci.*, 1, 175-195.
- Watanabe, T., Kiron, V., y Satoh, S. 1997. Trace minerals in fish nutrition. *Aquaculture*, 151(1-4), 185-207.
- Wittwer, F., 2012. Manual de Patología Clínica Veterinaria, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Austral de Chile second ed. Valdivia, Chile.
- Yang, Y., Wu, Z., Ren, Y., Zhou, Z., Wang, W. X., Huang, Y., & Shu, X. 2022. Improving heat resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by dietary zinc supplementation. *Aquaculture Nutrition*, 2022.
- Yuan, Y., Luo, J., Zhu, T., Jin, M., Jiao, L., Sun, P y Zhou, Q. 2020. Alteration of growth performance, meat quality, antioxidant and immune capacity of juvenile *Litopenaeus vannamei* in response to different dietary dosage

forms of zinc: Comparative advantages of zinc amino acid complex. *Aquaculture*, 522:735120.

- Zafra Trelles, A. M., Díaz Barboza, M. E., Dávila Gil, F. A., Fernández Chumbe, R. E., Vela Alva, K. A., y Guzmán Santiago, H. H. (2019). Conversión y eficiencia alimenticia de *Oreochromis aureus* var. *suprema* (Cichlidae) con diferente alimento balanceado en sistema cerrado, Trujillo, La Libertad, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 815-826.
- Zago A., C., Franceshini, L., Garcia, F., Canello S., S. H., Gozi K., S. y Da Silva R., J. 2014. Ectoparasites of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in cage farming in a hydroelectric reservoir in Brazil. *Braz. Journal Veterinary Parasitological, Jaboticabal*. 23 (2):171-178.
- Zago, A. C., Franceschini, L., Abdallah, V. D., Müller, M. I., Azevedo, R. K., y da Silva, R. J. 2021. Morphological and molecular data of new species of *Characithecium* and *Diaphorocleidus* (Monogenea: Dactylogyridae) from Neotropical characid fishes. *Parasitology International*, 84, 102406.
- Zhang, Y., Lu, R., Qin, C., y Nie, G. 2020. Precision nutritional regulation and aquaculture. *Aquaculture Reports*, 18:100496.