



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS

POSGRADO EN BIOCENCIAS

TASA DE CAMBIO DEL PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS n-3 Y n-6 DEL FILETE DE *Oreochromis niloticus* EN RESPUESTA AL LÍPIDO DIETARIO

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRO EN BIOCENCIAS

presenta:

JESUS ENCINAS MUNGARRO

Hermsillo, Sonora, México

29 de agosto de 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Hermosillo, Sonora a 29 de agosto de 2023.

Asunto: Licencia de uso no exclusiva

**UNIVERSIDAD DE SONORA
P R E S E N T E.**

Por este conducto hago constar que soy autor y titular de la obra denominada “**Tasa de cambio del perfil de ácidos grasos n-3 y n-6 del filete de *Oreochromis niloticus* en respuesta al lípido dietario**” (LA OBRA), que realicé como trabajo terminal siendo estudiante de Maestría, como requisito para obtener el Grado de **Maestro en Biociencias** en la Universidad de Sonora (UNISON), y en justa retribución autorizo a la UNISON, para que divulgue total o parcialmente LA OBRA mediante repositorios, bibliotecas, distribución electrónica y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines educativos, de investigación, de extensión y de difusión de la cultura, las veces que se requieren y en cualquiera otra forma en que a juicio de la UNISON sea necesario utilizarla, sin fines de lucro, en el entendido de que habrá de respetar en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente.

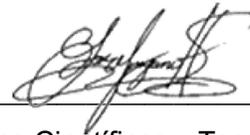
De la misma manera, manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general cualquier parte de LA OBRA son de mi entera responsabilidad, por lo que deslindo a la UNISON por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual y/o cualquier responsabilidad relacionada con la OBRA del que suscribe, frente a terceros.

Esta autorización es gratuita y la otorgo por un tiempo de cinco años, renovable automáticamente por el mismo periodo, reservándome el derecho de manifestar, en un plazo de cuando menos treinta días naturales previos a su vencimiento, su revocación por escrito dirigido a la Rectoría de la Universidad de Sonora.

Así mismo, esta autorización no es exclusiva y no implica la cesión de mis derechos patrimoniales.

A T E N T A M E N T E

Nombre completo y firma: Jesús Encinas Mungarro _____



Departamento Académico: Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

Dirección: Luis Donald Colosio s/n, entre Sahuaripa y Reforma. Col Centro, C.P. 83000. Hermosillo, Sonora, México.

Correo electrónico y teléfono: posgrado.biociencias@unison.mx Tel. (662) 2592169.

**TASA DE CAMBIO DEL PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS n-3 Y n-6 DEL FILETE DE
Oreochromis niloticus EN RESPUESTA AL LÍPIDO DIETARIO**

T E S I S

para obtener el grado de:

MAESTRO EN BIOCIENCIAS

presenta:

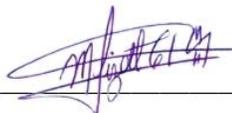
JESUS ENCINAS MUNGARRO

Hermosillo, Sonora, México.

29 de agosto de 2023

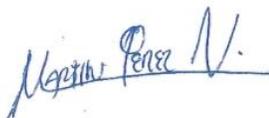
APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis intitulada TASA DE CAMBIO DEL PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS n-3 Y n-6 DEL FILETE DE *Oreochromis niloticus* EN RESPUESTA AL LÍPIDO DIETARIO presentada por Jesus Encinas Mungarro, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Biociencias.



Dra. Mayra Lizett González Félix

Directora



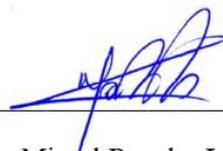
Dr. Martín Pérez Velázquez

Co-director



Dra. Ana Gloria Villalba Villalba

Sinodal



Dr. Misael Rosales Leija

Sinodal externo

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre, cuya presencia me ayuda a afrontar los desafíos del camino. A mi padre y hermana, que a su manera siempre están para mí, y a mis amigos, quienes se volvieron parte importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora y al Posgrado en Biociencias por permitir mi ingreso y estancia en el posgrado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado.

A la Dra. Mayra Lizett González Félix y al Dr. Martín Pérez Velázquez, por su apoyo, asesoramiento y dirección en el desarrollo del presente proyecto de investigación y en mi paso por el Posgrado en Biociencias.

A mis sinodales el Dr. Misael Rosales Leija y a la Dra. Ana Gloria Villalba Villalba por su apoyo en los seminarios.

Al personal de la Unidad Experimental Kino por brindarnos todas las facilidades durante nuestra estancia, en especial a Jesús Isidro Vázquez Cota, Asistente Técnico, y al Dr. Manuel Zúñiga Panduro por el apoyo otorgado durante el desarrollo de la fase experimental del estudio.

A mis compañeros de laboratorio, Reyna Dayhana Félix Berumen y Hugo Cañedo Orihuela por la compañía y apoyo brindado durante esta etapa.

A mi familia, amigos, docentes y todos aquellos que de manera directa o indirecta apoyaron en el desarrollo de este proyecto de investigación y en mi estancia en el posgrado.

RESUMEN

Oreochromis niloticus, conocida como tilapia del Nilo, ocupa el tercer lugar en volumen de producción acuícola en el mundo. Crece satisfactoriamente en ausencia de ácidos grasos dietarios altamente insaturados de la familia n-3, como los ácidos eicosapentaenoico (EPA) y docosahexaenoico (DHA). Sin embargo, su contenido puede enriquecerse con dietas de terminación para alcanzar un valor deseable de 250 mg de EPA + DHA, valor recomendado para consumo humano diario por la Organización Mundial de la Salud, otorgándole así un valor económico y nutraceútico adicional. El objetivo de este estudio fue evaluar la tasa de cambio del perfil de ácidos grasos en músculo de tilapia utilizando alimentos formulados con aceite de soya (AS) o pescado (AP) en un bioensayo de 8 semanas, e incluyendo además dos tratamientos adicionales que consistieron en el suministro de la dieta AP durante 4 semanas seguido por AS durante 4 semanas más, y el tratamiento inverso. Al finalizar el estudio no se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos en el desempeño en crecimiento de tilapia (peso ganado: 103.28-115.83 g; tasa de crecimiento específico: 6.60-6.83%/día; ganancia diaria en peso: 1.95-2.19 g/día; supervivencia: 96.67-100%), eficiencia alimenticia (1.16-1.31), índices corporales (índice hepatosomático:1.48-1.89%; factor de condición: 2.25-2.43), o en la composición proximal del filete, confirmando su versatilidad para utilizar eficientemente lípidos de distinta naturaleza. Sin embargo, el perfil de ácidos grasos del aceite utilizado en las dietas influyó directamente el perfil de ácidos grasos del filete. Se confirmó que, bajo estas condiciones experimentales, es posible enriquecer el filete de *O. niloticus* y alcanzar la concentración de 250 mg de EPA + DHA en una porción de 100 g de filete en solamente 10 días, en peces de la talla utilizada en este estudio.

ABSTRACT

Oreochromis niloticus, known as Nile tilapia, is ranked third in production volume from aquaculture in the world. It grows adequately in the absence of dietary highly unsaturated fatty acids of the n-3 family, such as eicosapentaenoic (EPA) and docosahexaenoic (DHA) acid. However, its fatty acid profile can be enriched by feeding finishing diets for some time before harvesting, to reach a desirable content of 250 mg EPA + DHA, recommended as the daily intake for human consumption by the World Health Organization, improving its economic and nutritional value as a nutraceutical. The objective of this study was to evaluate the rate of change in the fatty acid profile of tilapia's muscle by feeding diets formulated with soy (SO) or fish oil (FO) in an 8-week bioassay, with two additional treatments feeding FO for 4 weeks, followed by SO for 4 additional weeks, as well as the reverse treatment. No significant differences among treatments were observed at the end of the study for growth performance (weight gain: 103.28-115.83 g; specific growth rate: 6.60-6.83%/day; daily weight gain: 1.95-2.19 g/day; survival: 96.67-100%), feed efficiency (1.16-1.31), body indices (hepatosomatic index:1.48-1.89%; condition factor: 2.25-2.43), or proximate composition of the fillet, confirming the versatility of tilapia to efficiently use lipid sources of different nature. However, the fatty acid profile of the dietary lipid source directly influenced the fatty acid profile of tilapia's fillet. It was confirmed that, under these experimental conditions, it is possible to enrich the fillet of *O. niloticus* and reach the concentration of 250 mg of EPA + DHA in a 100 g fillet in just 10 days, for fish of the experimental size used in this study.

INDICE GENERAL

APROBACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	4
I.1. Tilapia del Nilo	4
I.1.1. Clasificación taxonómica y descripción de <i>Oreochromis niloticus</i>	5
I.1.2. Hábitos alimenticios.....	5
I.1.3. Producción mundial	6
I.1.4. Producción nacional.....	6
I.2. Lípidos	6
I.2.1. Clasificación	7
I.2.2. Ácidos grasos.....	8
I.2.2.1. Ácidos grasos de la familia n-6 y n-3	9
I.2.2.2. Síntesis de HUFAs.....	10
I.2.2.3. Beneficio de los HUFAs n-3 en peces	11
I.2.2.4. Beneficio de los HUFAS n-3 en la salud humana.....	13
I.2.2.5. Consumo de HUFAs n-3 en dietas humanas	15
I.2.2.6. Aporte nutricional de los peces cultivados	16
I.2.2.7. Enriquecimiento del perfil lipídico de <i>O. niloticus</i>	19
II. HIPOTESIS	21
III. OBJETIVOS	22
III.1. Objetivo general.....	22
III.2. Objetivos específicos.....	22
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	23
IV.1. Obtención de los organismos	23
IV.2. Sistema de cultivo experimental	23

IV.3. Diseño experimental	24
IV.4. Formulación y preparación de dietas experimentales	24
IV.5. Siembra, alimentación y mantenimiento de organismos.....	25
IV.6. Calidad del agua.....	27
IV.7. Toma de muestras semanales	28
IV.8. Parámetros de crecimiento, eficiencia alimenticia e índices corporales	28
IV.9. Análisis de la composición proximal	29
IV.9.1. Humedad	29
IV.9.2. Ceniza	29
IV.9.3. Proteína cruda	30
IV.9.4. Contenido energético	30
IV.9.5. Grasa cruda	30
IV.10. Perfil de ácidos grasos.....	30
IV.11. Índices de aterogenicidad y trombogenicidad.....	31
IV.12. Análisis estadístico.....	31
V. RESULTADOS	33
V.1. Desempeño en crecimiento, índices corporales y eficiencia alimenticia	33
V.2. Composición proximal	33
V.3. Análisis de ácidos grasos.....	34
VI. DISCUSION	46
VI.1. Crecimiento, índices corporales y eficiencia alimenticia.....	46
VI.2. Composición proximal.....	48
VI.3. Perfil de ácidos grasos.....	48
VII. CONCLUSIONES.....	55
VIII. RECOMENDACIONES	56
IX. LITERATURA CITADA	57

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Imagen de FAO (2009)..... 4
- Figura 2.** Ruta biosintética de ácidos grasos altamente insaturados n-6 y n-3, mediante vías de desaturación y elongación del ácido linoleico y linolénico. Fuente: Monroig *et al.*, 2011. 11
- Figura 3.** Concentración semanal de LOA (18:2n-6) en el filete de *O. niloticus* alimentada AP o AS durante 8 semanas. 39
- Figura 4.** Concentración semanal de LOA (18:2n-6) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP durante 8 semanas. 39
- Figura 5.** Concentración semanal de LOA (18:2n-6) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP a partir de la semana 4, y ecuaciones polinómicas cúbicas que mejor describen la tendencia de concentración. 40
- Figura 6.** Concentración semanal de EPA (20:5n-3) en el filete de *O. niloticus* alimentada AP o AS durante 8 semanas. 41
- Figura 7.** Concentración semanal de EPA (20:5n-3) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP durante 8 semanas. 41
- Figura 8.** Concentración semanal de DHA (22:6n-3) en el filete de *O. niloticus* alimentada AP o AS durante 8 semanas. 42
- Figura 9.** Concentración semanal de DHA en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP durante 8 semanas. 42
- Figura 10.** Concentración semanal de EPA (20:5n-3) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP a partir de la semana 4, y ecuaciones polinómicas cúbicas que mejor describen la tendencia de concentración, con la predicción para la concentración nutracéutica mediante la resolución de la ecuación de AS/AP. Para $y = -0.0267x^3 + 0.4293x^2 - 2.0398x + 3.0497$; si $y = 0.375$ mg de EPA, entonces $x = 5.5003$; $P = (5.5003, 0.375)$. Entonces, $5.5003 = 10.5$ días a partir del 1er día de la semana 4. 43
- Figura 11.** Concentración semanal de DHA (22:6n-3) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP a partir de la semana 4, y ecuaciones polinómicas cúbica (AS/AP) y cuártica (AP/AS) que mejor describen la tendencia de concentración, con la predicción para la concentración nutracéutica mediante la resolución de la ecuación de AS/AP. Para $y = -0.13x^3 + 2.1079x^2 - 10.209x + 16.371$; si $y = 2.125$ mg de DHA, entonces $x = 5.3041$; $P = (5.3041, 2.125)$. Entonces, $5.3041 = 9.1$ días a partir del 1er día de la semana 4..... 44

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Beneficios del consumo de EPA y DHA en diversos padecimientos.	15
Tabla 2.	Protocolo de alimentación semanal para los cuatro tratamientos experimentales.....	24
Tabla 3.	Ingredientes (g/100 g de dieta) y composición proximal determinada (%) de las dietas experimentales para tilapia del Nilo (<i>O. niloticus</i>) alimentada con aceite de pescado (AP) o de soya (AS) durante ocho semanas, AP durante 4 semanas seguido por AS durante 4 semanas más (AP/AS), y el tratamiento inverso (AS/AP).	26
Tabla 4.	Perfil de ácidos grasos (mg/g de dieta) de las dietas experimentales y de acondicionamiento.	27
Tabla 5.	Valores promedio de parámetros de calidad del agua registrados durante el periodo experimental.	28
Tabla 6.	Crecimiento, índices biológicos y eficiencia alimenticia de la tilapia del Nilo (<i>O. niloticus</i>) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una.....	32
Tabla 7.	Composición proximal del músculo de tilapia del Nilo (<i>O. niloticus</i>) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una.	33
Tabla 8.	Perfil de ácidos grasos del músculo de tilapia del Nilo (<i>O. niloticus</i>) alimentada con aceite de pescado (AP) o de soya (AS) durante 4 semanas.	37
Tabla 9.	Perfil de ácidos grasos del filete de tilapia del Nilo (<i>O. niloticus</i>) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una.	38
Tabla 10.	Concentración conjunta de EPA y DHA en mg/100 g de filete de tilapia del Nilo (<i>O. niloticus</i>) alimentada con aceite de pescado (AP) o de soya (AS) durante ocho semanas, e índices de aterogenicidad (IA) y trombogenicidad (IT).	45
Tabla 11.	Concentración conjunta de EPA y DHA en mg/100 g de filete de tilapia del Nilo (<i>O. niloticus</i>) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una, e índices de aterogenicidad (IA) y trombogenicidad (IT).	45

INTRODUCCIÓN

La acuicultura es una actividad económica productiva que hace uso de técnicas, conocimientos e infraestructura procedentes de distintas áreas del conocimiento para el cultivo de organismos acuáticos de interés comercial. Dicha actividad se destaca dentro del ámbito agropecuario debido a su gran crecimiento en los últimos años, lo que contrasta con la extracción del medio natural mediante pesquerías, las cuales hoy en día no son capaces de abastecer la demanda de alimento de calidad para una población en constante crecimiento (FAO, 2022).

La diversidad de organismos acuáticos cultivados es tan vasta que surge la necesidad de clasificarla en subáreas según las especies en cuestión (crustáceos, moluscos, peces, algas, etc.) y la finalidad del cultivo (consumo humano, ornamentales, industrial, etc.). Un área que destaca en esta industria es la piscicultura, la cual tiene como principal objetivo la producción de peces para el consumo humano. La FAO (2022) reportó que durante el año 2018 se tuvo una producción mundial de pescado de 179 millones de toneladas, de los cuales 82 millones de toneladas fueron producto de cultivos acuícolas, representando el 42% de la productividad mundial.

Un factor determinante para el acelerado crecimiento de esta industria es el uso de alimento balanceado, ya que estos contienen los niveles adecuados de los principales componentes nutrimentales para asegurar el éxito en la producción. Una de las principales biomoléculas en dietas son los lípidos, y el perfil lipídico del alimento se ve reflejado en el filete del pez cultivado y, por lo tanto, en su calidad nutricional (Turchini et al., 2009).

El estancamiento en la producción de recursos pesqueros ha propiciado el cambio en el uso de aceite de pescado en alimento balanceado para acuicultura, que es fuente de ácidos grasos esenciales altamente insaturados de cadena larga (HUFAs por sus siglas en inglés) pertenecientes a la familia n-3, que incluye los ácidos eicosapentaenoico (EPA, 20:5n-3) y docosahexaenoico (DHA, 22:6n-3), y que brindan grandes beneficios a la salud de peces y del consumidor final, el ser humano. Sin embargo, al ser sustituido por otras fuentes lipídicas, principalmente vegetales que son generalmente ricas en ácidos grasos de la familia n-6, se altera el perfil lipídico de los peces en cultivo (Turchini et al., 2011).

El cambio en la fuente lipídica dietaria afecta mayormente a determinadas especies, y no todos los peces son naturalmente ricos en HUFAs n-3. De manera general, los peces se pueden dividir en dos grandes grupos según su composición lipídica; los peces magros, quienes poseen carne blanca con un contenido en grasa inferior al 2%, mientras que los peces grasos tienen grandes reservas lipídicas entre sus paquetes musculares, por arriba de 2%. Por otra parte, los peces de naturaleza dulceacuícola suelen poseer niveles bajos de EPA y DHA, mientras que las especies marinas pueden contener, comparativamente, altos contenidos de HUFAs n-3 (Turchini et al., 2009, 2011).

En su medio natural, los peces de origen marino consumen grandes cantidades de EPA y DHA debido a la abundancia de éstos en las cadenas tróficas marinas, siendo incapaces de satisfacer esta demanda por sí mismos por su limitada o nula capacidad biosintética. En contraste, los peces dulceacuícolas poseen la maquinaria enzimática para sintetizar EPA y DHA. No obstante, los alimentos balanceados comerciales para peces dulceacuícolas están formulados principalmente a base de aceite de soya, que predispone el perfil lipídico de los peces en cultivo incrementando los ácidos grasos n-6 y disminuyendo los HUFAs n-3, afectando la calidad nutricional del filete para el ser humano (Montero et al., 2005). Este fenómeno se puede contrarrestar mediante el uso de dietas de terminación, que son alimentos enriquecidos con moléculas de interés (en este caso HUFAs n-3) utilizados en la etapa final del cultivo para restaurar el perfil lipídico de los organismos marinos lo más cercano posible a un individuo silvestre (Turchini et al., 2009).

Este tipo de dietas también pueden ser empleadas bajo un contexto de enriquecimiento en peces de agua dulce para fortalecer su perfil lipídico con fines nutraceuticos, es decir, una alternativa natural con beneficios fisiológicos para la salud humana. Este tipo de trabajo se ha realizado en especies importantes en acuicultura de agua dulce, como lo es el bagre de canal (*Ictalurus punctatus*) y la carpa común (*Cyprinus carpio*) (Manning et al., 2006; Schultz et al., 2015).

Una especie de pez magro dulceacuícola que destaca en piscicultura es la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), la cual se posiciona en tercer lugar de producción a nivel mundial con 4.5 millones de toneladas producidas en 2020 (FAO, 2022). Esta especie se caracteriza por tener un rápido crecimiento y alcanzar una talla comercial de 400-600 g en 7 a 9 meses, además de

ser resistente a enfermedades y a una calidad de agua subóptima, así como también por poseer un sabor sutil (Bhujel, 2000; FAO, 2009).

Se ha realizado anteriormente la evaluación del enriquecimiento del filete de tilapia del Nilo utilizado dietas de terminación ricas en EPA y DHA, utilizando como fuentes lipídicas aceite de pescado o bien harina de microalga *Schizochytrium sp.* para reemplazar el aceite de maíz (Stoneham et al., 2018). Después de ocho semanas se demostró que las dietas causaron el incremento en ácidos grasos n-3 y la disminución de n-6, mejorando la proporción n-3/n-6 en el filete. Sin embargo, precisar el tiempo en el que se puede alcanzar un valor de concentración de EPA y DHA óptimo para el consumo humano es de gran interés, esto aún no ha sido determinado. El consumo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para promover la salud del ser humano es de 250 mg/día de EPA + DHA (FAO, 2010); dicha concentración en el filete permitiría su comercialización como un producto nutraceúutico. Adicionalmente, la precisión para predecir el tiempo mínimo requerido para enriquecer el filete de la tilapia del Nilo hasta dicha concentración puede reducir el tiempo de alimentación con dietas de terminación enriquecidas con una fuente de ácidos grasos n-3 como aceite de pescado, coadyuvando a la sustentabilidad de la actividad acuícola. Por tal motivo, el presente proyecto pretende evaluar la tasa de cambio en el perfil de ácidos grasos n-3 y n-6 del filete de *O. niloticus* en respuesta al lípido dietario suministrado.

I. ANTECEDENTES

I.1. Tilapia del Nilo

La tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758), es una especie de pez tropical de agua dulce nativa del continente africano perteneciente a la familia Cichilidae (Figura 1). Se caracteriza por ser un pez omnívoro con tendencia herbívora, cuya alimentación va desde fitoplancton hasta pequeños invertebrados y demás fauna béntica (FAO, 2009).

Esta especie se ha convertido en una de las predilectas para la implementación en cultivos acuícolas, debido a diversos atributos, como su gran resistencia a calidad de agua subóptima; así mismo, presenta un rápido crecimiento, logrando una talla comercial de 400 a 600 g en 7 a 9 meses. También se le atribuye una gran capacidad reproductiva, ya que las hembras alcanzan la madurez sexual en un promedio de 4 a 5 meses, con un rango de ovoposiciones de 2 a 4 huevos por gramo de pez. Además, posee una gran resistencia a enfermedades y un sabor sutil. Es importante mencionar que, debido a los atributos antes mencionados para tilapia del Nilo, la especie ha sido introducida como especie de cultivo en diversas partes del mundo; no obstante, estas mismas características la pueden convertir en un depredador voraz para especies nativas y/o endémicas, por lo que es importante establecer buenas prácticas de acuicultura que permitan la sustentabilidad del cultivo y la preservación de especies endémicas (Bhujel, 2000; FAO, 2009; Vajargah, 2021).

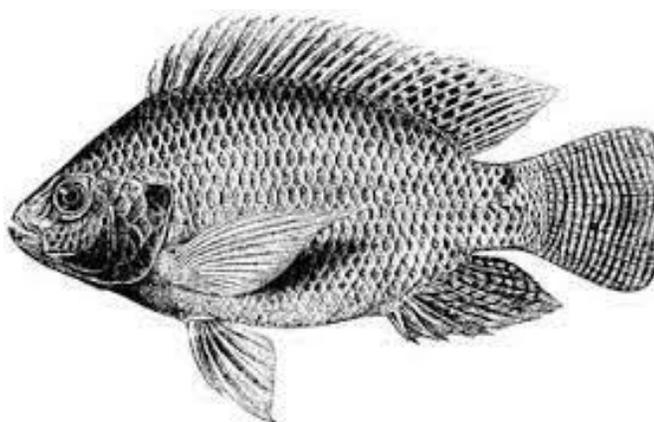


Figura 1. Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Imagen de FAO (2009).

I.1.1. Clasificación taxonómica y descripción de *Oreochromis niloticus*

La clasificación taxonómica de *O. niloticus* es la siguiente (CONABIO, 2014):

- Clase: Actinoterygii
 - Orden: Perciformes
 - Familia: Cichlidae
 - Género: *Oreochromis*
 - Especie: *O. niloticus* Linnaeus, 1758

I.1.2. Hábitos alimenticios

De manera general, los hábitos alimenticios de los organismos acuáticos se pueden clasificar según el origen del alimento (carnívoros, herbívoros y omnívoros), así como el grado de especialización o capacidad de asimilación de nutrientes, siendo estenófagos quienes tienen una limitada variabilidad en los alimentos consumidos, monófagos quienes comen un tipo específico de alimento, y eurífagos quienes son capaces de asimilar un amplio espectro de alimentos sin problema. Las diferencias y similitudes entre los modos de alimentación de los organismos pueden ser claramente observadas en las adaptaciones morfológicas y fisiológicas de su tracto digestivo (Halver y Hardy, 2002).

Según lo anterior, *O. niloticus* se clasifica como eurífago omnívoro, ya que en medios naturales su dieta comprende una mayor proporción de fitoplancton, seguido de zooplancton, además de insectos, nemátodos, partículas de detritus, y también se han reportado casos donde la tilapia del Nilo funge como un depredador introducido, alimentándose de huevecillos y peces menores en estanques (Wagaw et al., 2022). La capacidad de la tilapia del Nilo para alimentarse de un amplio espectro trófico ha sido un factor clave para su éxito en la industria acuícola, permitiendo alimentarla con diversas fuentes proteicas y lipídicas distintas al aceite y harina de pescado, obteniendo un excelente rendimiento comercial.

I.1.3. Producción mundial

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), menciona que para el año de 2020 se cultivaron un total de 49.1 millones de toneladas de peces de agua dulce, momento en que la tilapia del Nilo se posicionó como la tercera especie más cultivada en el mundo con un total de 4.5 millones de toneladas, que representa el 9% de la producción total para ese año. Las especies que superan a la tilapia del Nilo son la carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idella*) y la carpa plateada (*Hypophthalmichthys molitrix*) (FAO, 2022).

I.1.4. Producción nacional

La tilapia del Nilo se introdujo a territorio mexicano proveniente de la Universidad de Auburn, Alabama al Centro de Acuicultura Tropical en Temascal, Oaxaca con fines experimentales (Ceballos y Velázquez, 1988; Arredondo y Lozano, 1996). Posteriormente, se introdujo a diferentes embalses y presas localizadas principalmente en Chiapas, Oaxaca, Tabasco, Michoacán, Veracruz y Sinaloa. El volumen de producción de mojarra-tilapia en México en 2020 fue de 72,595.96 toneladas con un valor de 2,066.43 millones de pesos (SAGARPA, 2021).

En el año 2004 se registró un incremento en la demanda de tilapia para consumo humano en diferentes presentaciones a nivel mundial, principalmente de tilapia roja y nilótica, lo que ha contribuido a la introducción de tilapia a nuevos sitios para su siembra y a la intensificación en su cultivo (Castillo-Campo, 2004).

I.2. Lípidos

Los lípidos son un diverso grupo de moléculas orgánicas que tienen como característica definitoria su relativa insolubilidad en agua, siendo mayormente solubles en compuestos no polares (éter, benceno, cloroformo, acetona, etc.). De manera general, los lípidos constan de grupos no polares, cuya estructura presenta un alto contenido de carbono e hidrógeno. Estas biomoléculas son mayormente conocidas por sus propiedades físicas (hidrofobicidad, punto de

fusión y estado físico, e.g., grasas o aceites), no obstante, al someterse a hidrólisis producen ácidos grasos y alcoholes complejos formando ésteres (Carvajal, 2019).

Los lípidos presentan una gran variedad de funciones en los seres vivos y se destacan como moléculas de almacenamiento de energía y estructurales, como es el caso de los fosfolípidos y esteroides, constituyentes de membranas biológicas. Así mismo, se desempeñan como cofactores enzimáticos, pigmentos de absorción de luz, componentes estructurales de hormonas, agentes emulsificantes en procesos digestivos y mensajeros intracelulares, entre otras funciones (Nelson y Cox, 2005; Halver y Hardy, 2002).

I.2.1. Clasificación

Debido a que las moléculas lipídicas pueden variar significativamente en su estructura y función, existen distintas formas de clasificarlas. La forma más utilizada en la literatura toma en cuenta el proceso de saponificación, el cual es una reacción química entre un éster derivado del glicerol (triglicérido, diglicérido, monoglicérido) y una base fuerte (NaOH o KOH) donde se rompen los enlaces éster de la molécula, obteniendo como productos el glicerol y sales de ácidos grasos, esta reacción es comúnmente utilizada para la elaboración de jabón (Aldai et al., 2003; Proaño et al., 2015). Tomando en cuenta lo anterior, los lípidos se clasifican en:

Saponificables

Como su nombre lo indica, estos lípidos pueden llevar a cabo el proceso de saponificación y dentro de ellos se encuentran los siguientes:

-*Lípidos simples*. Son ésteres de ácidos grasos asociados a alcoholes (moléculas con grupo OH) y, dependiendo del tipo de alcohol presente en la estructura, se subdividen en ceras y grasas.

-*Lípidos complejos*. Son ésteres de ácidos grasos que presentan diversos grupos químicos, además del alcohol éster de ácidos grasos. Se subdividen en:

--*Fosfolípidos*. Importantes en membranas biológicas, se constituyen por dos ácidos grasos esterificados a una molécula de glicerol asociada por un enlace fosfato a una cabeza polar anfipática.

--*Glicolípidos*. Se forman con un ácido graso y carbohidratos asociados a esfingosina.

--*Otros lípidos.* Lipoproteínas, sulfolípidos y aminolípidos.

No Saponificables

Dentro de esta categoría se encuentran las vitaminas liposolubles (A, D, E y K), aldehídos grasos, glicerol y otros alcoholes, cuerpos cetónicos, esteroides, hormonas e hidrocarburos.

I.2.2. Ácidos grasos

Los ácidos grasos son los principales y más simples componentes de los lípidos y son necesarios en la nutrición humana como fuente de energía y para cumplir funciones de carácter metabólico y/o estructural. Su estructura comprende una cadena hidrocarbonada con un grupo carboxilo terminal. La cadena puede presentar ninguno, uno o varios dobles enlaces, entonces se denominan ácidos grasos insaturados, mientras que los ácidos grasos que carecen de dobles enlaces se les llama saturados. Es importante mencionar que, la calidad nutricional de las grasas depende de su composición de ácidos grasos (FAO, 2010).

Ácidos grasos saturados

Este tipo de ácidos grasos están formados por una cadena de carbono sin dobles enlaces. La ausencia de insaturaciones contribuye a la disminución de la fluidez de membranas celulares cuando estos lípidos fungen como unidades estructurales celulares. Se obtienen principalmente a través de la ingesta dietética de grasas animales. Sin embargo, el cuerpo es capaz de sintetizarlos a partir de carbohidratos a través del proceso de lipogénesis. La mayoría de los estudios de ácidos grasos saturados se centran únicamente en su tendencia a alterar el metabolismo de las lipoproteínas e influir en los niveles de colesterol (Arrazola, 1994).

Ácidos grasos insaturados

La característica definitoria de estos lípidos es la presencia de uno o más dobles enlaces en la cadena carbonada. Estos se dividen en dos grupos según el número de dobles enlaces que presenten; cuando hay un doble enlace se denomina monoinsaturado, cuya abreviatura es MUFAs (monounsaturated fatty acids, por sus siglas en inglés); aquellos con 2 o 3 dobles enlaces se denominan poliinsaturados o PUFAs (polyunsaturated fatty acids). Por último, los ácidos grasos con 4 o más insaturaciones son conocidos como ácidos grasos altamente

insaturados o HUFAs (highly unsaturated fatty acids), aunque también se les conoce como LC-PUFAs (long-chain polyunsaturated fatty acids) (Cabezas-Zábala et al., 2016).

Los ácidos grasos también se clasifican en tres subgrupos según su longitud de cadena. Cabe señalar que dicha nomenclatura varía según el autor, entre las más recientes se encuentra la siguiente (Creative Proteomics, 2023):

- Ácidos grasos de cadena corta con colas alifáticas: 5 átomos de carbono o menos.
- Ácidos grasos de cadena mediana con colas alifáticas: 6 a 12 átomos de carbono.
- Ácidos grasos de cadena larga con colas alifáticas: 13 a 21 átomos de carbono.
- Ácidos grasos de cadena muy larga con colas alifáticas: más de 22 átomos de carbono.

1.2.2.1. Ácidos grasos de la familia n-6 y n-3

Los ácidos grasos de la familia omega-6 (n-6) poseen la primera insaturación en el carbono número 6 contando a partir del grupo metilo terminal (Holman, 1954). Estos lípidos son abundantes en productos vegetales como nueces, cereales y granos, pan integral y la mayoría de los aceites vegetales, especialmente el de soya, además se encuentra en huevos y aves de corral. El ácido linoleico (LOA, 18:2n-6), un ácido graso esencial de 18 carbonos y dos insaturaciones perteneciente a esta familia, funge como sustrato para la síntesis del ácido araquidónico (ARA, 20:4n-6), un ácido graso altamente insaturado que posee 4 insaturaciones y 20 carbonos, el cual es precursor de eicosanoides como las prostaglandinas de la serie 2 que tienen un efecto potenciador en los procesos inflamatorios y favorecen la coagulación sanguínea. Estos ácidos grasos no son estrictamente perjudiciales, pues cumplen funciones necesarias en el organismo, pero no se debe exceder su consumo (Pérez et al., 1998).

Los ácidos grasos que presentan el primer doble enlace en la cadena en el carbono tres a partir del grupo metilo terminal pertenecen a la familia omega-3 (n-3). El ácido linolénico: (LNA, 18:3n-3) funge como sustrato para la síntesis de HUFAs en esta familia, tales como el EPA (20:5n-3) y DHA (22:6n-3). El ácido linolénico es abundante en semillas de chía, linaza y nueces, mientras que los HUFAs n-3 son abundantes en pescados, mariscos y algas de origen

marino, y confieren grandes beneficios a la salud del ser humano (Coronado et al., 2006) como se describe en las secciones I.2.2.3. y I.2.2.4.

1.2.2.2. Síntesis de HUFAs

La ruta biosintética de ácidos grasos altamente insaturados de cadena larga (Figura 2) involucra una serie de procesos enzimáticos catalizados por dos desaturasas, la Δ -6 desaturasa y la Δ -5 desaturasa, las cuales introducen dobles enlaces a la cadena hidrocarbonada, y dos elongasas principales Elovl5 y Elovl2 quienes añaden dos átomos de carbono a la molécula (Sargent et al., 2002).

La ruta da inicio con dos ácidos grasos esenciales, el ácido linolénico (LNA, 18:3n-3) y el ácido linoleico (LOA, 18:2n-6), donde la Δ -6 desaturasa convierte a los sustratos iniciales a 18:4n-3 y 18:3n-6, respectivamente (Sprecher, 2000). Esta desaturasa se reconoce como una enzima limitante, ya que es la encargada del primer paso de esta ruta biosintética cuya eficiencia y afinidad dependen de la competencia entre la concentración de sustratos suministrados en la dieta (Hastings et al., 2001), sin embargo, se ha registrado una mayor afinidad enzimática para el ácido linolénico en tilapia del Nilo (Karapanagiotidis et al., 2007).

Posteriormente, la Elovl5 induce la reacción de condensación que da como resultado la elongación de la cadena hidrocarbonada existente añadiendo 2 carbonos, resultando en productos de 20 carbonos. En este punto, se repiten los procesos de desaturación y elongación (Monroig et al., 2011).

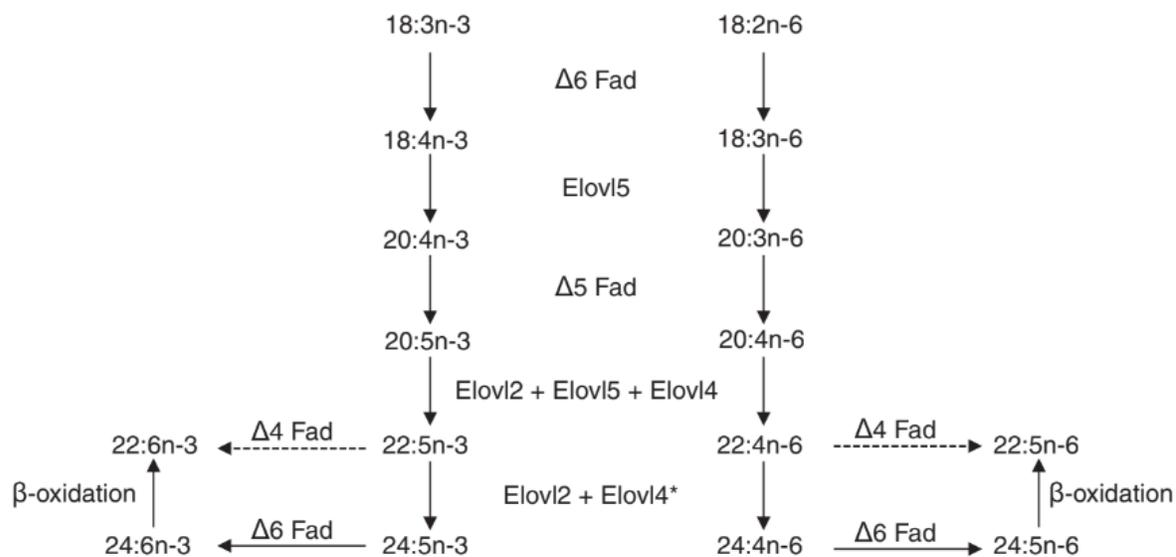


Figura 2. Ruta biosintética de ácidos grasos altamente insaturados n-6 y n-3, mediante vías de desaturación y elongación del ácido linoleico y linolénico. Fuente: Monroig *et al.*, 2011.

Para la obtención de los productos finales n-3 de esta ruta metabólica se requiere un paso extra; en un punto se sintetizan ácidos grasos de 24 carbonos derivados del EPA, que requieren ser introducidos a peroxisomas, en donde se remueven dos átomos de carbono conservando las insaturaciones. Los productos resultantes son el ácido docosapentaenoico (DPA, 22:5n-3) y el DHA (22:6n-3), quedando disponibles para su utilización metabólica, por ejemplo, para incorporarse a los fosfolípidos que forman las membranas celulares (Sprecher, 2000).

1.2.2.3. Beneficio de los HUFAs n-3 en peces

Dietas ricas en EPA y DHA son utilizadas en etapas cruciales para el éxito de un cultivo, tal es el caso del éxito reproductivo, ya que estos ácidos grasos son importantes tanto para la fertilización como para una eclosión exitosa y la calidad de las ovas en general; por ende, el consumo en la dieta de HUFAs n-3 por los reproductores es crítico (Tocher, 2010), particularmente en especies marinas. Estudios han corroborado la correlación entre estos parámetros reproductivos y los HUFAs n-3 en bacalao del atlántico (*Gadus morhua*), la dorada (*Sparus aurata*) y la lubina europea (*Dicentrarchus labrax*) (Montero *et al.*, 2005; Pousão-Ferreira *et al.*, 1998; Rojбек *et al.*, 2014).

Asimismo, los HUFAs n-3 son esenciales en las etapas larvarias ya que tienen un efecto positivo en la supervivencia, crecimiento y desarrollo. En el caso de peces marinos, el DHA y EPA también juegan un papel en la promoción de la metamorfosis, pigmentación, desarrollo del sistema nervioso y la visión. De manera que es importante satisfacer los requerimientos de estos ácidos grasos durante esta importante etapa del ciclo de vida y, para asegurar su consumo durante el cultivo, se utilizan alimentos vivos (como rotíferos y *Artemia* sp) enriquecidos con emulsiones que contienen HUFAs, que adicionalmente estimulan el instinto predatorio y aseguran una mayor supervivencia y oportunidad de éxito (Bell et al., 1997; Tocher, 2010).

La suplementación de PUFAs y HUFAs en la dieta de peces puede reducir la demanda de energía para su biosíntesis mediante producción endógena (Gladyshev et al., 2022) y pueden promover la resistencia a enfermedades a través de tres rutas funcionales principales que mitigan los principales sistemas de estrés, a saber, el sistema inmunológico inflamatorio (IIS), el eje hipotálamo-pituitario-suprarrenal (eje HPA) y el sistema nervioso autónomo (ANS) (Balasch y Tort, 2019). Por otra parte, la contaminación y los metales pesados son agentes tóxicos relevantes debido a su gran toxicidad y fácil acumulación en tejidos, siendo capaces de ser transportados por las cadenas tróficas hasta llegar al humano (Afshan et al., 2014). Neeraj et al. (2022) mostraron que el suministro de dietas enriquecidas con una combinación de DHA y EPA a 0.2 y 0.4%, respectivamente, redujeron considerablemente la bioacumulación de arsénico en tejidos. Además del efecto individual de EPA y DHA, la proporción de estos componentes también es importante para el proceso fisiológico de los animales acuáticos, incluidos los peces. Generalmente la proporción utilizada en la formulación de dietas es de 2:1 (DHA:EPA), ya que el EPA funciona como sustrato para la creación de derivados de mayor tamaño, siendo el DHA el más importante (Sprecher, 2000). Así mismo, estos son precursores de las prostaglandinas y leucotrienos, sustancias hormonales de actividad paracrina importantes en la respuesta fisiológica al estrés y en procesos de coagulación y antiinflamatorios (Sargent et al., 2002; Trushenski et al., 2012).

1.2.2.4. Beneficio de los HUFAS n-3 en la salud humana

Existe una extensa y sólida evidencia de los beneficios de los ácidos HUFAs n-3 en la salud humana; es posible observar un punto de inflexión en la evolución humana en poblaciones que consumían alimentos de origen marino con respecto a quienes implementaron una dieta terrestre. La incorporación de dietas ricas en HUFAs n-3 coincide con el grado de sofisticación de las culturas consumidoras, progresivamente elaborando cerámica, herramientas, textiles, rituales fúnebres y ornamentación personal, habilidades que fueron los cimientos para el origen de los pueblos que conformaron las civilizaciones del Mediterráneo (Bradbury, 2011).

Dicha evidencia puede ser rastreada en el registro fósil de la especie humana, principalmente en el desarrollo del sistema nervioso central, haciendo posible la vinculación entre la dieta y el tamaño del cerebro. La incorporación de pescados y mariscos permitió la expansión del cerebro sobre la corteza cerebral y el cerebro humano actual presenta la mayor cantidad de DHA entre los tejidos corporales. La evolución de este órgano es mayormente visible en el paso evolutivo de *Homo erectus* a *Homo sapiens*, cuyo proceso de encefalización fue exponencial en los últimos 200,000 años en comparación al de otros homínidos contemporáneos (Bradbury, 2011).

El cerebro humano posee un perfil lipídico particular con altos niveles de ácido palmítico (16:0), no obstante, un aproximado del 60% de los lípidos cerebrales son HUFAs, donde el DHA es el principal constituyente representando aproximadamente el 85% de los HUFAs totales en este órgano (Dyall, 2015; Sanhueza et al., 2004). Durante el periodo gestacional, el desarrollo del sistema nervioso central ocurre principalmente en el último trimestre del embarazo humano; en este periodo inicia la generación activa de neuronas, por ende, el requerimiento de DHA aumenta considerablemente para asegurar un adecuado funcionamiento de este vital órgano (Valenzuela y Nieto, 2001). Una de las funciones que el DHA cumple como neuroprotector es la regulación en la síntesis de fosfatidilserina, este fosfolípido cumple un rol de protección neuronal y ayuda a ejercer el proceso de sinapsis (Kim et al, 2014). La síntesis y acumulación de fosfatidilserina es dependiente del nivel de DHA en la membrana cerebral. El aumento de los niveles de HUFAs n-3 provocaría un aumento en la producción de fosfatidilserina, lo cual se ve reflejado en una mayor supervivencia neuronal (Akbar et al., 2005).

En el conocimiento popular, siempre se asocia al consumo de HUFAs n-3 con un incremento en la inteligencia, y esto no está alejado de la realidad, ya que investigaciones respaldan que el DHA cumple un rol predominante en el hipocampo; esta región del cerebro se encarga de uno de los procesos cognitivos fundamentales para supervivencia de los organismos: la memoria declarativa (recuerdos o hechos específicos que pueden ser evocados de forma consciente), y esta región también es capaz de producir nuevas neuronas en la etapa adulta (Olivares et al., 2015). Los niveles de DHA en esta región cerebral han sido directamente asociados con la ingesta de la dieta, ya que a mayores niveles se ha demostrado un incremento en los procesos de aprendizaje dependientes de esta región, mientras que por otro lado el DHA se ha ligado a fenómenos de neurogénesis hipocámpal en el cerebro adulto (Leyva-Rendón, 2011). De manera que los beneficios de los HUFAs n-3 en el sistema nervioso central del ser humanos son de gran relevancia.

También aportan beneficios al sistema circulatorio; los padecimientos relacionados con el sistema cardiovascular son uno de los principales problemas de salud a nivel mundial, diversos factores son los responsables de la presencia de este tipo de padecimientos. Se ha visto que más del 60 % de la población adulta en México presenta al menos algún factor de riesgo (tabaquismo, obesidad y sobrepeso, hipertensión, diabetes o dislipidemia), sin embargo, la alimentación es un aspecto fundamental para tomar en cuenta en la prevención de estas afecciones (Dávila-Torres, 2015). El efecto de los ácidos grasos omega-3 en la prevención de enfermedades cardíacas está asociado con su efecto en la reducción de triglicéridos en sangre; así mismo, también pueden desempeñar un papel anti-aterosclerótico al regular la función endotelial, la estabilidad de la membrana, la inflamación, la peroxidación de lípidos, la reducción de la activación y agregación plaquetaria, regulando también la presión arterial y la frecuencia cardíaca (Piñeiro-Corrales et al., 2013; Mori et al., 1997).

Existen diversos estudios que sustentan lo anterior, como el de Burr et al. (1989), quienes mencionan que la ingesta regular de estos ácidos grasos en pacientes con infarto de miocardio reciente reduce la tasa de mortalidad en un 29%. La efectividad del EPA y DHA en la prevención de insuficiencia cardíaca, accidente cerebrovascular, arritmia, miocardiopatía e hipertensión también se ha establecido (Li et al., 2022). Beneficios adicionales que los HUFAs n-3 pueden tener en la prevención de ciertas enfermedades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Beneficios del consumo de EPA y DHA en diversos padecimientos.

Padecimiento	Aporte	Referencias
Cáncer	Inhibe la carcinogénesis en el cáncer de colon, disminuye el riesgo de padecerlo e incrementa la eficacia de la quimioterapia. En una muestra de mujeres chinas, se observó que la baja proporción de n-3/n-6 dietarios puede estar positivamente relacionada con el riesgo de sufrir cáncer de colon.	Villanueva y Mach, 2011; Murff et al., 2009
Alzheimer	Tanto el DHA como el EPA pueden reducir la neuroinflamación y el deterioro cognitivo, pero el EPA influye positivamente en los trastornos del estado de ánimo, mientras que el DHA ayuda a mantener la estructura cerebral normal.	Devassy et al., 2016
Demencia senil	Estudios epidemiológicos demuestran que las dietas ricas en omega-3 son asociadas con un menor riesgo de demencia, aunado a un estilo de vida saludable, con una dieta adecuada y ejercicio físico.	Castro y Balaszczuk, 2020
Déficit de atención / hiperactividad	Existen diferencias metabólicas en el manejo de los HUFAS n-3 entre los adolescentes con trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH) y los controles normales. Se requiere examinar a detalle el valor de los suplementos de omega-3 para mejorar el perfil de ácidos grasos y los comportamientos asociados con el TDAH.	Colter et al., 2008
Fibrosis quística	En los pacientes con fibrosis quística se alteran las concentraciones de ácidos grasos esenciales, señal de que los pacientes pueden verse beneficiados con la suplementación con estos ácidos grasos para aumentar significativamente las concentraciones de EPA y DHA.	Hanssens et al., 2016

1.2.2.5. Consumo de HUFAs n-3 en dietas humanas

La síntesis de ácidos grasos omega-3 es un proceso independiente a la síntesis de ácidos grasos omega-6, aunque en efecto los precursores de ambos compiten por las mismas enzimas durante el proceso de transformación a sus respectivos derivados de mayor tamaño, por ende, se requiere un equilibrio en su consumo dietario (Valenzuela et al., 2011).

La proporción en el consumo de PUFAs en la dieta humana se ha modificado a la par de la globalización y factores socioeconómicos afectan al modo de alimentación de las personas;

se conoce que la proporción óptima en el consumo de ácidos grasos n-3:n-6 para promover la salud humana es de 1:1 hasta 1:5 (Lupette y Benning, 2020). No obstante, se ha observado una marcada tendencia al aumento en el consumo de PUFAs n-6 y una disminución considerable en el caso del consumo de PUFAs y HUFAs n3. Esto ha llevado a una modificación súbita en la proporción de ingesta de estos ácidos grasos, ya que, en la dieta occidental se presenta una proporción de n-3:n-6 que varía entre 1:1 y hasta 1:20, mientras que en países asiáticos con una gran tradición en consumo de mariscos y alimentos marinos como es el caso de Japón, su dieta promedio posee un balance de 1:4, lo cual se ve reflejado significativamente en la salud de los consumidores (Sugano y Hirahara, 2000).

En términos de la recomendación para el consumo de EPA y DHA, la OMS postuló en 2015 un VRN-ENT (Valor de referencia de nutrientes para enfermedades no transmisibles) de 250 mg/día para la combinación de EPA + DHA en adultos. Lo cual indica que, si un humano adulto sano consume la cantidad indicada de dichos nutrientes, reduce el riesgo de enfermedades provocadas por una dieta carente de estos lípidos. En este caso, son principalmente afecciones asociadas a enfermedad coronaria y eventos degenerativos del sistema nervoso central, entre otros padecimientos.

1.2.2.6. Aporte nutricional de los peces cultivados

El alimento es el insumo de mayor importancia en la industria de producción animal, ya que su calidad y composición se ve reflejada en la carne del animal producido. En el caso de la acuicultura, los costos de alimento balanceado equivalen a aproximadamente un 60% del costo total de producción, por ende, es de suma importancia que las dietas sean rentables y nutricionalmente equilibradas, para de esta manera asegurar el rendimiento de la granja acuícola (Sathishkumar y Félix, 2021). Durante un largo tiempo, la fuente de proteína y lípido en las dietas acuícolas han sido la harina y el aceite de pescado, respectivamente; no obstante, el estancamiento de la industria pesquera ha incrementado los costos de estos insumos, volviendo insostenible su uso en dietas comerciales. En este sentido, los nutriólogos están buscando ingredientes y enfoques alternativos para reemplazar y compensar el uso de estos ingredientes en los alimentos balanceados (Maldonado-Othón et al., 2020). En el caso de los lípidos, existe

una gran variedad de investigaciones enfocadas en la sustitución total y/o parcial del aceite de pescado como fuente de lípidos en las dietas (Bordignon et al., 2023; Maldonado-Othón et al., 2022; Fernandes et al., 2018; Wijekoon et al., 2015). En la actualidad el sustituto lipídico mayormente utilizado en dietas comerciales es el aceite de soya, cuyos ácidos grasos en mayor proporción son el linoleico (53.46%), oleico (18:1n-9, 23.47%), palmítico (16:0, 11.44%), linolénico (6.64%) y el esteárico (18:0, 4.14%), y con un 51.0% de n-6 PUFAs y 6.8% de n-3 PUFAs (Turchini et al., 2009; Lafont et al., 2014).

Con respecto a la calidad nutricional de un pez marino en comparación con un pez de agua dulce, específicamente para los lípidos, esta característica estará en función de la cantidad y tipo de grasas que aporten, especialmente de la familia y grado de insaturación de sus ácidos grasos. Se sabe que existen distintos factores que determinan el tipo y porcentaje de PUFAs en el músculo del pez. De manera general, los peces marinos poseen una mayor cantidad de DHA y EPA en contraste con los peces de agua dulce, ya que las cadenas tróficas presentes en los ecosistemas marinos funcionan como un mecanismo de transporte de estos ácidos grasos, iniciando con los productores primarios de estos lípidos que son las microalgas. Se sabe que *Schizochytrium sp.*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Isochrysis galbana*, acumulan EPA y DHA en la forma de microgotas citoplasmáticas de triglicéridos (aceite) y también en los fosfolípidos de sus membranas (plasmática y retículos), llegando a acumular hasta 49% de DHA en la concentración lipídica total (Perez-Velazquez et al., 2019). Las microalgas son consumidas por el zooplancton, al cual lo conforman organismos como rotíferos, crustáceos, larvas de peces, etc. A su vez, el zooplancton sirve como alimento de pequeños peces que terminaran siendo presa de peces grandes, como lo son atunes, salmones, pargos, entre otros, y mediante la pesca, terminaran en la dieta de los seres humanos. En contraste, los peces de agua dulce no poseen esta abundancia y tipo de microalgas productoras de HUFAs n-3 en sus ecosistemas, por lo cual se ven obligados a sintetizarlos mediante su propia maquinaria enzimática de desaturación y elongación, a partir de ácidos grasos precursores, para poder así satisfacer sus requerimientos de DHA y EPA y, por ende, la concentración de estos ácidos grasos en tejido será considerablemente menor que la de un pez de agua marina (Chen et al., 2013).

En peces marinos, debido a que en su medio natural se encuentran rodeados por una abundancia de fuentes de DHA y EPA, han perdido la capacidad biosintética enzimática de

elongación y desaturación de ácidos grasos, o bien, es sumamente limitada por desuso a lo largo de su historia evolutiva. No obstante, al momento de ser cultivados en sistemas comerciales surge la necesidad de suplementar estos ácidos grasos en su dieta, siendo la principal fuente el aceite de pescado. El reemplazo de aceite de pescado por aceites vegetales (principalmente aceite de soya) ha predominado en las formulaciones de alimento, que cambia el perfil lipídico de los organismos en cultivo, reduciendo significativamente los niveles de HUFAs n-3 y aumentando los HUFAs n-6, perdiendo los beneficios que el DHA y EPA confieren a la salud humana (Turchini et al., 2009).

La aplicación de una estrategia de alimentación con dietas enriquecidas con moléculas de interés en la etapa final del cultivo, conocidas como dietas de terminación, para de esta forma tratar de restaurar a las condiciones nutricionales del filete lo más próximo a las de un organismo silvestre, ha sido una muy exitosa en muchas especies de cultivadas (Turchini et al., 2009). En peces alimentados con aceites vegetales se opta por una estrategia de depuración o “washout”, donde se les suministrada una dieta con base en aceite de pescado durante un tiempo específico, que puede ser de alrededor de tres meses, aunque depende de la especie, y que tiene la finalidad de disminuir los niveles de PUFAs y HUFAs n-6, e incrementar los HUFAs n-3, sobre todo DHA y EPA, antes de su comercialización. Este tipo de estrategias se han implementado en pargo rojo (*Pagrus auratus*), lubina europea (*D. labrax*), salmón del Atlántico (*Salmo salar*), y dorada (*S. aurata*), entre otros (Glencross et al., 2003; Montero et al., 2005; Bell et al., 2004; Ballester-Lozano et al., 2011).

No obstante, las dietas de finalización no solo son utilizadas para restauración, si no también, bajo un contexto de enriquecimiento del perfil lipídico en peces de agua dulce, donde se busca superar los niveles de DHA y EPA que tendrían naturalmente, para poder comercializar estas especies en mercados selectos como un producto nutracéutico. Este tipo de aproximaciones se implementan en peces establecidos comercialmente, como lo son el bagre de canal (*Ictalurus punctatus*) y la carpa común (*C. carpio*) (Schultz et al., 2015; Manning et al., 2006).

1.2.2.7. Enriquecimiento del perfil lipídico de *O. niloticus*

Los estudios realizados para mejorar el perfil lipídico de la tilapia del Nilo se han realizado de dos formas, la primera se basa en el suministro de dietas que presenten altos niveles de ácido linolénico (18:3n-3) el cual funge como sustrato para la desaturación y elongación para convertirlos en HUFAs n-3. No obstante, al optar por este tipo de fuente lipídica la concentración final de DHA y EPA se limita a la capacidad sintética de la tilapia. Diversos estudios optan por usar esta estrategia como depuración para el ácido linoleico (18:2n-6) (Karapanagiotidis et al., 2007; Almeida et al., 2014, 2015; Celestino et al., 2014; Costa et al., 2014).

En la investigación de Justi et al. (2003), se suministró una dieta con base en aceite de linaza, rico en ácido linolénico, por periodos de 0, 10, 20 y 30 días, obteniendo una mayor concentración de ácidos grasos n-3 en contraste con los n-6. Sin embargo, la mayor proporción de n-3 correspondía a ácido linolénico y no a EPA y/o DHA, por lo que no puede ser considerado nutracéutico, pero al equilibrar la relación n-3/n-6 si puede mejorar hasta cierto punto la calidad nutricional del filete en cuestión.

La segunda aproximación consiste en la implementación de dietas a base de aceite de pescado y/o microalgas, las cuales son ricas en DHA y EPA, para suministrar estos ácidos grasos de manera directa permitiendo su acumulación selectiva y progresiva según el tiempo de uso de la dieta de terminación. Oliveira et al. (2021) suministraron dietas con 0% (grupo control), 5%, 10% y 15% de aceite de pescado, en tratamientos de 30 y 60 días, donde, las tilapias que obtuvieron los niveles más altos de DHA se encontraron en el grupo de 10% alimentadas durante 60 días, obteniendo un total de 85.0 mg de DHA por 100 g de pez, siendo equivalente al 6.12% de los ácidos grasos totales del filete.

Así mismo, Suloma et al. (2022), pretendieron establecer una técnica de depuración del ácido linoleico (18:2n-6) mediante una dieta de terminación a base de aceite de pescado al 10%. El experimento tuvo una duración de 6 semanas; se asignaron 3 tratamientos: alimentación con aceite de pescado (AP) por 6 semanas, aceite de soya (AS) por 6 semanas, y en el tercero se alimentó con la dieta AS durante tres semanas seguida de la dieta AP durante las tres semanas restantes. Los peces alimentados con AP por 6 semanas mostraron niveles inferiores de ácido

linoleico (11.6% de ácidos grasos totales) en contraste con los demás tratamientos. No obstante, los valores para DHA y EPA no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, lo cual indica que el suministro de una dieta con aceite de pescado al 10% durante 6 semanas, en efecto depura los niveles de ácido linoleico, pero no aumenta significativamente los HUFAS n-3.

Por otro lado, Stoneham et al. (2018) enriquecieron el filete de tilapia con base en dos dietas, una con AP y otra con harina de microalgas (HM: *Schizochytrium sp.*) durante 8 semanas, y lograron elevar el EPA de 7.03 mg en el grupo control, a 36.7 mg con AP y a 9.2 mg con HM, mientras que el DHA se elevó de 70.6 mg a 205.6 y 366.4 mg, respectivamente. Mencionan que no solo se elevó el valor comercial del filete, si no también es posible aprovechar los intestinos, hígado y piel de las tilapias cultivadas, ya que son subproductos enriquecidos de gran utilidad en diversas industrias.

II. HIPOTESIS

El cambio del perfil de ácidos grasos n-3 y n-6 del filete de *O. niloticus* pudiera lograrse en aproximadamente 8 semanas.

III. OBJETIVOS

III.1. Objetivo general

Evaluar la tasa de cambio del perfil de ácidos grasos n-3 y n-6 en el filete de *Oreochromis niloticus* en respuesta al lípido dietario.

III.2. Objetivos específicos

- a) Formular y evaluar experimentalmente dietas para *Oreochromis niloticus* utilizando aceite de soya y aceite de pescado como fuente de lípidos.
- b) Analizar el perfil de ácidos grasos de las dietas formuladas.
- c) Evaluar el efecto de las dietas formuladas sobre los parámetros de producción de tilapia.
- d) Evaluar su efecto sobre la tasa de cambio del perfil de ácidos grasos n-3 y n-6 del filete de tilapia.
- e) Evaluar su efecto sobre la tasa de cambio de los índices de trombogenicidad y aterogenicidad en músculo de tilapia.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un experimento con una duración de 56 días con tilapia del Nilo (*O. niloticus*) en el Laboratorio Húmedo de Nutrición Acuícola de la Unidad Experimental Kino (UEK) del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS) ubicado en Bahía de Kino, Sonora, México. Previo al inicio del experimento, los organismos experimentales se alimentaron con una dieta de acondicionamiento formulada con ácido esteárico (18:0) durante 14 días.

IV.1. Obtención de los organismos

Se obtuvieron alevines de *O. niloticus* con un peso promedio individual de 0.26 ± 0.00 g del Laboratorio CRILAP S.P.R. de R.L., ubicado en San Pedro el Saucito, Sonora, México. Los organismos fueron transportados al Laboratorio Húmedo de Nutrición Acuícola ubicado en la Unidad Experimental Kino (UEK), en Bahía de Kino, Sonora, México.

IV.2. Sistema de cultivo experimental

El sistema de cultivo experimental consistió en 24 tanques circulares con capacidad de 250 litros (71 cm de diámetro, 0.4 m^2 de superficie) que fueron llenados con aproximadamente 150 litros de agua dulce. Cada tanque contó con suministro de aire constante por medio de mangueras, piedras aireadoras y un soplador de 1.0 HP (Fuji, Modelo VFC40, Saddle Brook, New Jersey, EUA). El sistema se encontró en constante recirculación de agua mediante una bomba de 1.5 HP (Jacuzzi, Modelo 150 MF-T, Little Rock, Arkansas, EUA). Adicionalmente, el sistema contó con un filtro biológico, un filtro de arena (Jacuzzi, modelo L-190-7, Little Rock, Arkansas, EUA) y una lámpara de luz UV de 12 watts (Rainbow salvavidas, Modelo UV97, El Monte, California, EUA). El flujo de agua en cada tanque se ajustó a 6 litros/minuto, lo que permitió una renovación del volumen total de agua cada 25 minutos; por otra parte, se realizó un recambio diario de aproximadamente 50% del volumen total de agua, con agua nueva y limpia, previamente filtrada y aireada para mantener óptima calidad de agua.

IV.3. Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental completamente aleatorio con 2 dietas experimentales, una a base de aceite de pescado (AP) y la segunda a base de aceite de soya (AS) que se suministraron durante ocho semanas. Adicionalmente se implementaron 2 tratamientos, donde la mitad de los tanques alimentados con AP se cambiaron a la dieta con AS (AP/AS) al finalizar la cuarta semana de cultivo, mientras que la mitad de los tanques alimentados con AS se cambiaron a la dieta con AP (AS/AP) en el mismo momento. Los cuatro protocolos de alimentación que se administraron por un total de ocho semanas se presentan en la Tabla 2. Cada tratamiento se asignó a 6 tanques experimentales.

Tabla 2. Protocolo de alimentación semanal para los cuatro tratamientos experimentales.

TRATAMIENTO	SEMANA							
	1	2	3	4	5	6	7	8
AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP
AS	AS	AS	AS	AS	AS	AS	AS	AS
AP/AS	AP	AP	AP	AP	AS	AS	AS	AS
AS/AP	AS	AS	AS	AS	AP	AP	AP	AP

IV.4. Formulación y preparación de dietas experimentales

Se formularon dos dietas isolipídicas (14% de grasa cruda) e isoproteicas (45% de proteína cruda), donde la única diferencia en la formulación fue la fuente de lípidos, aceite de pescado (AP) o aceite de soya (AS). Adicionalmente, se elaboró una dieta de acondicionamiento (ACON) cuya fuente de lípido fue ácido esteárico (18:0), la cual fue suministrada dos semanas previas al inicio del experimento para limitar las fuentes dietarias de ácidos grasos n-3 y n-6, y uniformizar el perfil de ácidos grasos de los organismos experimentales. La composición de las dietas experimentales y su perfil de ácidos grasos se presentan en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

Para la elaboración de las dietas, se pesaron los ingredientes individualmente y se mezclaron durante 30 minutos en equipo extrusor Hobart A-200 hasta lograr su

homogenización; una vez homogenizados se añadieron los aceites y se continuó la homogenización durante 10 minutos, finalmente se añadió agua hirviendo continuando con el proceso de mezcla hasta alcanzar una textura uniforme para proceder con el proceso de peletización. El secado de pellets se realizó con ventiladores durante 24 horas a 40°C; transcurrido este tiempo, las dietas se almacenaron en bolsas individuales etiquetadas en congelación a -20°C hasta su uso.

IV.5. Siembra, alimentación y mantenimiento de organismos

Posteriormente a las dos semanas de acondicionamiento, los peces fueron pesados grupalmente y colocados en cada uno de los tanques experimentales, utilizando una densidad de siembra de 15 peces/tanque, siendo seleccionados de forma aleatoria, registrando un peso individual inicial promedio (\pm error estándar de la media, EE) de $3.11 \text{ g} \pm 0.01$. Los peces se alimentaron a saciedad tres veces al día con ayuda de señales visuales para ajustar la ración diaria, a las 8:00, 13:30 y 19:00 h. Las heces se retiraron mediante sifoneo diariamente antes de la primera alimentación del día.

Tabla 3. Ingredientes (g/100 g de dieta) y composición proximal determinada (%) de las dietas experimentales para tilapia del Nilo (*O. niloticus*) alimentada con aceite de pescado (AP) o de soya (AS) durante ocho semanas, AP durante 4 semanas seguido por AS durante 4 semanas más (AP/AS), y el tratamiento inverso (AS/AP).

Ingredientes	Acondicionamiento	AP	AS
Caseína ¹	21.80		
Músculo de calamar fresco ²	21.00		
Harina de soya ³		25.00	25.00
Aislado de proteína de soya ³		23.15	23.15
Harina de chícharo ⁴	10.50	9.00	9.00
Harina de pescado (sardina) ⁵		5.00	5.00
Harina de trigo ⁶	23.07	13.92	13.92
Almidón de trigo ⁷	4.00	4.00	4.00
Aceite de pescado ⁵		12.53	
Aceite de soya ⁸			12.53
Ácido esteárico ⁹ (>95%; FG)	11.92		
CaP-dibásico ¹	4.20	3.40	3.40
Vitaminas/minerales ¹⁰ (Rovimix)	2.00	2.00	2.00
Lecitina de soya ¹¹	1.00	1.00	1.00
Metionina ¹²	0.16	0.65	0.65
Sal (NaCl) ¹	0.25	0.25	0.25
Vitamina Stay C 35% ¹³	0.10	0.10	0.10
<i>Total (%)</i>	100.00	100.00	100.00
<i>Composición proximal (%)</i>			
Proteína cruda	49.20 ± 0.51	45.59 ± 0.45	44.90 ± 0.55
Grasa cruda	16.13 ± 0.17	14.50 ± 0.82	14.36 ± 0.14
Humedad	8.82 ± 0.16	5.97 ± 0.11	6.06 ± 0.07
Ceniza	8.11 ± 0.03	9.82 ± 0.04	9.76 ± 0.05
NFE	17.74	24.12	24.92
Energía total (kJ/g)	20.1 ± 0.01	20.0 ± 0.04	20.0 ± 0.03

¹ Fagalab, Mocorito, Sinaloa, México.

² WALMART, Hermosillo, Sonora, México.

³ Procesadora de ingredientes, S.A. de C.V. Guadalajara, Jalisco, México.

⁴ HABACUQ Comercializadora Química S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México.

⁵ Productos Pesqueros de Guaymas (PROPEGUAY) S.A. de C.V., Guaymas, Sonora, México.

⁶ Los Gallos, Molino La Fama S.A. de C.V., Hermosillo, Sonora, México.

⁷ Gluten y Almidones Industriales, S.A. de C.V., Ciudad de México, México.

⁸ Ragasa Industrias S.A. de C.V. Monterrey, Nuevo León, México.

⁹ FG: Grado alimenticio. Sigma-Aldrich, St Louis, Missouri, EUA.

¹⁰ Rovimix, Insumos Nubiot, Ciudad Obregón, Sonora, México.

¹¹ Golden Harvest, Impulsora Golden, S.A. de C.V., Ciudad de México, México.

¹² Alfa, Aesar, Ward Hill, Massachusetts, EUA.

¹³ Stay C® (L-ascorbyl-2-polyphosphate 35% active C), Roche Vitamins Inc., Parsippany, New Jersey, EUA.

Tabla 4. Perfil de ácidos grasos (mg/g de dieta) de las dietas experimentales y de acondicionamiento.

Ácido graso	ACON	Dieta experimental	
		AP	AS
16:0	9.12	68.54	47.34
18:0	407.85	15.59	16.85
18:1n-9	2.71	49.94	86.46
18:2n-6	12.50	21.69	210.89
18:3n-3	0.00	4.27	26.11
20:4n-6	0.00	4.22	0.00
20:5n-3	0.00	29.97	1.23
22:6n-3	5.34	34.06	1.77
Saturados	416.98	114.31	65.11
Monoinsaturados	2.71	72.26	87.03
PUFA + HUFA	28.38	123.76	251.54
Total n-3	15.88	94.11	40.65
Total n-6	12.50	27.23	210.89
n-3/n-6	1.27	3.66	0.19

AP: Aceite de pescado; AS: Aceite de soya; ACON: dieta de acondicionamiento; Saturados: 14:0, 16:0, 18:0, 20:0; Monoinsaturados: 14:1, 16:1, 18:1n-9, 18:1n-5, 20:1; PUFA+HUFA: 16:2, 16:3, 18:2n-6, 18:3n-6, 18:3n-3, 18:4n-3, 20:3n-6, 20:4n-6, 20:4n-3, 20:5n-3, 21:5n-3, 22:4n-6, 22:5n-6, 22:5n-3, 22:6n-3, 24:5n-3, 24:6n-3; Total n-3: 18:3n-3, 18:4n-3, 20:4n-3, 20:5n-3, 21:5n-3, 22:5n-3, 22:6n-3, 24:5n-3, 24:6n-3; Total n-6: 18:2n-6, 18:3n-6, 20:3n-6, 20:4n-6, 22:4n-6, 22:5n-6.

IV.6. Calidad del agua

A lo largo del experimento se realizaron mediciones diarias de oxígeno disuelto y temperatura con un oxímetro multifunción (YSI, Modelo Pro2030, Yellow Springs, OH, EUA), mientras que el pH se midió semanalmente (Meter pH/ISE, Thermo Scientific, Modelo Orion 4-Star pH/ISE, Beverly, MD, EUA), al igual que la concentración de nitrógeno amoniacal total y nitritos, que fueron determinados mediante un espectrofotómetro Hach (Modelo DR3900, Loveland, CO, EUA). Los valores promedio obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores promedio de parámetros de calidad del agua registrados durante el periodo experimental.

Parámetro	Valor promedio
Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L)	5.54 ± 0.69
Temperatura (°C)	29.09 ± 0.92
Nitrógeno amoniacal total (mg NH ₄ -N/L)	0.30 ± 0.25
Nitritos (mg NO ₂ -N/L)	0.12 ± 0.14
pH	8.05 ± 0.61

IV.7. Toma de muestras semanales

Cada semana se tomaron muestras de 3 tanques (unidades experimentales) por cada tratamiento, alternando los tanques experimentales que se muestrearon cada semana con la finalidad de ajustar densidades de siembra y homogenizarla cada dos semanas. Las muestras consistieron en 3 peces/tanque, y fueron etiquetadas y transportadas en refrigeración al laboratorio de Nutrición Acuícola del DICTUS. Posteriormente, el músculo de los tres peces se homogenizó para obtener 1 muestra compuesta/tanque. Cabe destacar que las primeras cuatro semanas experimentales solo se muestrearon dos tratamientos, AP y AS, ya que hasta ese punto ocurrió el cambio en las dietas para los tratamientos AP/AS y AS/AP.

IV.8. Parámetros de crecimiento, eficiencia alimenticia e índices corporales

Al concluir las 8 semanas de cultivo, los organismos restantes fueron pesados grupalmente para evaluar el desempeño biológico y eficiencia alimenticia, mientras que para los índices corporales se utilizaron los organismos previamente muestreados semanalmente. Se analizaron los siguientes parámetros: peso inicial (g); peso final (g); peso ganado (g) = (peso final, g – peso inicial, g); porcentaje de peso ganado (%) = (peso final, g – peso inicial, g) / peso inicial, g × 100; ganancia diaria de peso (g/día) = peso ganado, g / tiempo, días; tasa de crecimiento específico (TCE, %/día) = (ln peso final – ln peso inicial) / tiempo, días × 100; supervivencia (%) = (No. final de organismos × 100 / No. inicial de organismos); índice hepatosomático (IHS,

%) = (peso del hígado, g / peso final, g); factor de condición (K) = (peso húmedo, g × 100) / longitud total³, cm; eficiencia alimenticia (EA) = peso ganado, g / alimento consumido, g.

IV.9. Análisis de la composición proximal

El análisis de composición proximal se realizó en las muestras semanales de cada tratamiento; para ello, se extrajo y se unificó el músculo de los peces y se conformó una muestra compuesta por tanque. Para dietas experimentales y de acondicionamiento, y organismos iniciales y acondicionados, se realizó análisis por triplicado. Los parámetros de composición proximal evaluados fueron: humedad, ceniza, grasa cruda y proteína cruda. Complementariamente se realizó, por duplicado, la determinación del contenido energético de las dietas experimentales.

IV.9.1. Humedad

La determinación de humedad se realizó siguiendo el método cuantitativo gravimétrico 930.15 de la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (AOAC, 2005). Una muestra de aproximadamente 2 g se sometió a pérdida de humedad en un horno de laboratorio a 105 °C durante 6 h. Al transcurrir el tiempo indicado, se retiró el crisol con pinzas y se dejó enfriar en un desecador por 30 min hasta alcanzar temperatura ambiente. Posteriormente, el crisol con la muestra seca se pesó y el porcentaje de humedad se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{peso crisol} + \text{muestra húmeda}) - (\text{peso crisol con muestra seca})}{\text{peso muestra húmeda}} \times 100$$

IV.9.2. Ceniza

La determinación de cenizas se realizó siguiendo el método cuantitativo 942.05 (AOAC, 2005). La muestra seca obtenida en la determinación de humedad se incineró en una mufla a 550°C durante 6 h. Posteriormente, se trasladó el crisol con las cenizas a un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y se pesó en una balanza analítica. El porcentaje de cenizas se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = (\text{peso de crisol con ceniza} - \text{peso de crisol}) / \text{peso de muestra húmeda} \times 100$$

IV.9.3. Proteína cruda

La determinación de proteína cruda se realizó por el método 986.06 (AOAC, 2005), mediante la combustión de muestras en un analizador de nitrógeno DUMAS (Modelo 702 NDA, VELP Scientifica, Usmate, Italia).

IV.9.4. Contenido energético

El contenido energético de las dietas experimentales se determinó mediante un calorímetro adiabático (Modelo IKA C5003, IKA-Werke GmbH, Staufen, Alemania) en muestras compactas de aproximadamente 1 gramo de dieta, por duplicado.

IV.9.5. Grasa cruda

La estimación de grasa cruda se obtuvo siguiendo el método descrito por Folch et al. (1957), que consiste en la extracción del lípido total con cloroformo/metanol 2:1 (v/v) para una muestra inicial de aproximadamente 2 gramos. El solvente se añadió al tubo con la muestra y se homogenizó, para después pasar al proceso de filtrado. Se adicionó KCl y se realizó un cambio de atmósfera con nitrógeno para evitar la oxidación de ácidos grasos, dejando reposar la muestra toda la noche a 4.0°C. Posteriormente, se extrajo la fase lipídica y se realizó la evaporación del solvente con inyección de nitrógeno. A partir de la diferencia de peso entre el tubo vacío y el tubo con la muestra evaporada se determinó el porcentaje de grasa total.

IV.10. Perfil de ácidos grasos

Siguiendo el método propuesto por Lochmann y Gatlin (1993), se obtuvieron los ácidos grasos libres a partir de las muestras finales obtenidas en la determinación de grasa cruda. Se adicionaron a la muestra aproximadamente 0.0040 g de ácido heptadecaenoico (17:0), que fungió como estándar interno, seguido del proceso de saponificación mediante la adición de 1

mL de KOH en metanol en baño María a 70°C por 10 min, y luego del de metilación mediante la adición de 1 mL de trifluoruro de boro (BF₃) en metanol 14% en baño María a 70°C por 30 min. Una segunda evaporación con nitrógeno eliminó los solventes. Finalmente, las muestras se llevaron a una concentración de 50 mg de ácidos grasos/mL, y una alícuota de 2.0 µL se inyectó en un cromatógrafo de gases (Modelo Varian 3800, Varian, Inc., Palo Alto, CA, EUA) equipado con una columna de sílice de 30 m x 0.25 mm y un detector de ionización de flama. La identificación de ácidos grasos se realizó por comparación de tiempos de retención usando un estándar conocido y su cuantificación se realizó mediante el estándar interno. Los valores de los ácidos grasos se expresaron en mg/g de peso húmedo de músculo o dieta experimental.

IV.11. Índices de aterogenicidad y trombogenicidad

Se calcularon los índices de aterogenicidad (IA) y trombogenicidad (IT) (Ulbricht y Southgate, 1991) para el músculo de tilapia utilizando las siguientes fórmulas:

- $IA = 12:0 + 4(14:0 + 16:0) / (n-6 + n-3 \text{ PUFA} + \text{HUFA}) + 18:1 + \Sigma\text{MUFA}$
- $IT = (14:0 + 16:0 + 18:0) / 0.5(18:1) + 0.5(\Sigma\text{MUFA}) + 0.5(n-6 \text{ PUFA} + \text{HUFA}) + 3(n-3 \text{ PUFA} + \text{HUFA}) + (n-3 \text{ PUFA} + \text{HUFA} / n-6 \text{ PUFA} + \text{HUFA})$

IV.12. Análisis estadístico

Se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para los parámetros de crecimiento, eficiencia alimenticia, índices corporales y perfil de ácidos grasos, después de la previa verificación de distribución normal y homocedasticidad en las varianzas. Se utilizó un nivel de significancia de $P \leq 0.05$ para establecer diferencias significativas entre los promedios de los tratamientos y la prueba de separación de promedios de Tukey-HSD en caso de observar diferencias estadísticas significativas. Los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete estadístico "Statistical Analysis System" (SAS Institute Inc., 2013, Software Release 9.4, Cary, NC, USA). Mediante la utilización de gráficos de concentración semanal de los ácidos grasos DHA+EPA se obtuvieron las ecuaciones polinomiales que mejor describieron la tendencia; la predicción del tiempo en que se alcanzó la concentración de 250 mg de DHA+EPA en el filete

de tilapia se obtuvo mediante recursos disponibles en línea en <https://www.symolab.com> (Symolab, 2023), y <https://www.geogebra.org> (Hohenwarter et al., 2018). Adicionalmente se analizó el decremento/incremento en la concentración de LOA semanalmente.

V. RESULTADOS

V.1. Desempeño en crecimiento, índices corporales y eficiencia alimenticia

El peso inicial de los organismos se analizó mediante análisis de varianza con la finalidad de asegurar que todos los peces iniciaran el experimento con peso uniforme en todos los tratamientos; el peso inicial fue de 3.11 ± 0.01 g (Tabla 6). En cuestión de las variables de desempeño biológico, supervivencia e índices corporales evaluados en esta investigación, no se registraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($P > 0.05$). Entre las variables de crecimiento, el peso final promedio de los peces osciló entre 106.39 y 118.93 g y se obtuvo un peso ganado entre 103.28 y 115.83 g, con una ganancia diaria de peso de alrededor de 2% para todos los tratamientos; la tasa de crecimiento específico (SGR) osciló entre 6.60 y 6.83 %/día (Tabla 6). La supervivencia tampoco se vio afectada por los tratamientos dietarios y osciló entre 96.67 y 100%. El índice hepatosomático y el factor de condición de los peces presentaron valores en un rango de 1.48 a 1.89% y de 2.25 a 2.43, respectivamente. La eficiencia alimenticia (FE), al igual que los demás parámetros, no mostró diferencias significativas entre tratamientos, y osciló entre 1.16 a 1.31 (Tabla 6).

V.2. Composición proximal

El mismo patrón de igualdad estadística ($P > 0.05$) se observó para el análisis de composición proximal del músculo en muestras semanales de tilapia. Es importante enfatizar que los resultados para las primeras cuatro semanas consisten solamente en dos tratamientos, y a partir de la semana cinco, se analizaron muestras para los cuatro tratamientos (Tabla 7). La proteína cruda en músculo de peces osciló en valores de alrededor de 22% a lo largo del experimento para peces de los diversos tratamientos, lo mismo que para peces iniciales y acondicionados. Solo se detectaron diferencias significativas en la semana 3 entre los peces de los tratamientos AP (22.58%) y AS (21.39%). La proporción de grasa cruda varió en forma aleatoria en cada semana dentro del rango de 1.98-3.41% en organismos alimentados con AP, 2.71-3.74% con AS, 2.64-3.21 con AP/AS, y 2.72-3.69% en AS/AP, mientras que en organismos iniciales y acondicionados la grasa cruda en músculo fue de 1.72 y 1.86%, respectivamente. Para la

humedad se presentaron valores que variaron entre aproximadamente 75 y 78%, sin diferencias entre tratamientos. El contenido de ceniza varió desde 0.37 hasta 2.14%, pero nuevamente sin diferencias entre tratamientos en ninguno de los tiempos de muestreo. En organismos iniciales la humedad y ceniza en músculo fueron de 75.26 y 1.06%, respectivamente, mientras que en organismos acondicionados fueron de 76.68 y 1.03%, respectivamente (Tabla 7).

V.3. Análisis de ácidos grasos

El perfil de ácidos grasos en las dietas experimentales fue claramente influenciado por la manipulación de la fuente lipídica utilizada, ya que con aceite de pescado se alcanzó un total de ácidos n-3 de 94.11 mg/g de dieta; la mayor proporción corresponde a DHA con 34.06 mg/g de dieta, y EPA con 29.97 mg/g de dieta, mientras que la concentración de n-6 fue de 27.23 mg/g de dieta. En contraste, la dieta formulada con aceite de soya presentó un total de ácidos grasos n-3 de 40.65 mg/g de dieta, mientras que para la familia n-6 se presentó un total de 210.89 mg/g de dieta, donde el ácido linoleico constituyó el único ácido graso en esta familia (Tabla 4).

El perfil de ácidos grasos del músculo de *O. niloticus* también tuvo influencia de los ácidos grasos presentes en las dietas suministradas. No obstante, en el caso de los ácidos grasos saturados y monoinsaturados, no se observaron diferencias sustanciales. El ácido palmítico (16:0) mostró valores de alrededor de 2-5 mg/g, y el ácido esteárico (18:0) osciló entre 1-2 mg/g, y no variaron significativamente entre tratamientos a lo largo del periodo experimental salvo para la semana 6 ($P = <0.001$ y 0.001 , respectivamente), lo que también se vio reflejado en diferencias estadísticas para la concentración total de ácidos grasos saturados esa misma semana ($P = <0.001$), que en general, osciló entre 2-6 mg/g las primeras 4 semanas, y hacia el final del experimento entre aproximadamente 2 a 8 mg/g. Esta misma tendencia se observó también en ácidos grasos monoinsaturados, cuyo representante más relevante fue el ácido oleico (18:1n-9); el total ácidos grasos monoinsaturados y el ácido oleico presentaron concentraciones sin diferencias estadísticas entre tratamientos a lo largo del periodo experimental, con excepción de la semana 6, donde se presentó una concentración de ácido oleico significativamente mayor ($P = 0.001$) en el tratamiento AS/AP (5.62 mg/g) que también se reflejó en el total de ácidos grasos monoinsaturados ($P < 0.001$; 7.12 mg/g) para AS/AP en esa misma semana (Tablas 8 y 9).

Tabla 6. Crecimiento, índices biológicos y eficiencia alimenticia de la tilapia del Nilo (*O. niloticus*) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una.

	AP	AS	AP/AS	AS/AP	<i>P</i> > <i>F</i>
Peso inicial (g)	3.11 ± 0.01	3.11 ± 0.01	3.11 ± 0.01	3.10 ± 0.01	0.9385
Peso final (g)	106.39 ± 5.76	108.99 ± 6.13	106.98 ± 4.19	118.93 ± 4.44	0.3130
Peso ganado (g)	103.28 ± 5.76	105.89 ± 6.13	103.87 ± 4.19	115.83 ± 4.44	0.3128
Porcentaje de peso ganado (%)	3322.77 ± 187.63	3408.31 ± 199.87	3341.72 ± 133.39	3736.04 ± 143.11	0.2988
Ganancia diaria de peso (g/día)	1.95 ± 0.11	2.00 ± 0.12	1.96 ± 0.08	2.19 ± 0.08	0.3189
TCE (%/día)	6.60 ± 0.11	6.64 ± 0.12	6.61 ± 0.07	6.83 ± 0.07	0.3157
Supervivencia (%)	96.67 ± 2.28	100.00 ± 0.0	96.67 ± 1.49	98.89 ± 1.11	0.2695
IHS (%)	1.76 ± 0.06	1.89 ± 0.08	1.69 ± 0.17	1.48 ± 0.08	0.1351
K	2.43 ± 0.05	2.32 ± 0.08	2.25 ± 0.02	2.32 ± 0.08	0.2824
EA	1.22 ± 0.13	1.20 ± 0.19	1.16 ± 0.09	1.31 ± 0.12	0.8813

Los valores son promedios ± EE de 6 réplicas. Los promedios con superíndices diferentes en cada renglón son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$). TCE: tasa de crecimiento específico; IHS: índice hepatosomático; K: factor de condición; EA: eficiencia alimenticia.

Tabla 7. Composición proximal del músculo de tilapia del Nilo (*O. niloticus*) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una.

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Peces iniciales	Peces acondicionados
AP										
Proteína cruda (%)	23.76 ± 0.44	23.09 ± 0.96	22.58 ^a ± 0.23	21.29 ± 0.21	21.03 ± 0.41	22.90 ± 0.35	21.80 ± 0.43	22.27 ± 0.58	21.29 ± 0.61	22.21 ± 0.47
Grasa cruda (%)	3.41 ± 0.33	2.78 ± 0.11	3.28 ± 0.14	3.10 ± 0.37	3.14 ± 0.37	1.98 ± 0.17	3.20 ± 0.09	2.49 ± 0.20	1.72 ± 0.64	1.86 ± 0.42
Humedad (%)	75.28 ± 0.52	76.12 ± 0.12	77.47 ± 0.13	78.14 ± 0.27	77.76 ± 0.58	76.81 ± 0.73	76.80 ± 0.55	77.36 ± 0.68	75.26 ± 0.17	76.68 ± 1.23
Ceniza (%)	1.57 ± 0.28	1.07 ± 0.05	0.44 ± 0.12	0.37 ± 0.03	1.23 ± 0.21	1.06 ± 0.03	1.31 ± 0.09	1.12 ± 0.08	1.06 ± 0.18	1.03 ± 0.02
AS										
Proteína cruda (%)	23.53 ± 0.57	22.90 ± 0.68	21.39 ^b ± 0.17	21.21 ± 0.31	22.08 ± 0.07	22.13 ± 0.67	21.79 ± 0.43	22.07 ± 0.18		
Grasa cruda (%)	3.36 ± 0.36	2.71 ± 0.23	3.19 ± 0.30	3.55 ± 0.18	2.82 ± 0.12	3.02 ± 0.58	3.74 ± 0.10	3.12 ± 0.99		
Humedad (%)	74.16 ± 1.16	75.76 ± 0.75	77.31 ± 0.20	77.59 ± 0.42	75.27 ± 1.46	76.59 ± 0.12	76.10 ± 0.32	75.36 ± 0.48		
Ceniza (%)	2.14 ± 0.20	0.99 ± 0.07	0.60 ± 0.08	0.43 ± 0.03	1.05 ± 0.07	1.10 ± 0.04	1.35 ± 0.06	1.16 ± 0.08		
AP/AS										
Proteína cruda (%)	-	-	-	-	21.31 ± 0.55	21.94 ± 0.16	22.06 ± 0.31	21.51 ± 0.73		
Grasa cruda (%)	-	-	-	-	2.85 ± 0.20	2.64 ± 0.10	3.00 ± 0.33	3.21 ± 0.22		
Humedad (%)	-	-	-	-	77.31 ± 0.37	76.45 ± 0.35	76.98 ± 0.34	77.77 ± 0.35		
Ceniza (%)	-	-	-	-	1.06 ± 0.22	1.14 ± 0.02	1.26 ± 0.05	1.11 ± 0.04		
AS/AP										
Proteína cruda (%)	-	-	-	-	21.55 ± 0.59	22.07 ± 0.24	21.52 ± 0.84	21.97 ± 0.09		
Grasa cruda (%)	-	-	-	-	2.72 ± 0.10	3.69 ± 0.15	3.23 ± 0.02	2.94 ± 0.56		
Humedad (%)	-	-	-	-	76.92 ± 0.29	76.59 ± 0.26	77.14 ± 0.05	77.44 ± 0.92		
Ceniza (%)	-	-	-	-	1.19 ± 0.04	1.06 ± 0.02	1.30 ± 0.08	1.01 ± 0.05		
ANOVA P > F										
Proteína cruda (%)	0.7642	0.8796	0.0145	0.8464	0.4558	0.3897	0.9186	0.7171		
Grasa cruda (%)	0.9367	0.7975	0.8010	0.3395	0.6161	0.0649	0.1750	0.7169		
Humedad (%)	0.4322	0.6551	0.5453	0.4156	0.2355	0.9480	0.2590	0.1003		
Ceniza (%)	0.1697	0.3595	0.3502	0.2273	0.8008	0.3522	0.8202	0.6031		

Los valores son promedios ± EE de 6 réplicas. Los promedios para la misma variable de composición proximal con superíndices diferentes en la misma semana son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$).

Por otro lado, la concentración total de ácidos grasos n-3 y n-6 en músculo de tilapia estuvo directamente relacionada con la naturaleza de la fuente lipídica, al igual que con el tiempo de suministro de la dieta. A partir de la semana 2, los n-6 totales presentaron los niveles más altos en el tratamiento AS prácticamente durante todo el periodo experimental y los niveles más bajos en el tratamiento AP, caso inverso a los n-3 totales, que resultaron significativamente o bien numéricamente más elevados en este último tratamiento a partir de la semana 2. En la proporción n-3/n-6 se registraron consistentemente diferencias estadísticamente significativas desde la primera semana, siendo siempre mayor en peces alimentados con AP, oscilando entre 1.45 y 2.09. El tratamiento AS/AP mostró mayor proporción n-3/n-6 que los tratamientos AP/AS y AS, significativamente mayores a partir de la semana 6, mientras que AP/AS y AS no presentaron diferencias estadísticas entre ellos (Tablas 8 y 9).

El principal efecto de la fuente lipídica dietaria se observó en tres ácidos grasos específicos: LOA, EPA y DHA. Para el caso del LOA, valores mayores se presentaron siempre, ya sea estadística o numéricamente, en peces alimentados con AS a lo largo del experimento (Tablas 8 y 9), y la mayor concentración fue registrada en la semana 7, con 13.76 mg/g. Para peces alimentados con AP, la concentración de LOA fue significativamente inferior, manteniéndose entre 0.74 y 1.72 mg/g durante todo el estudio (Figura 3). Al realizar el cambio en las dietas en la semana 4 (Figura 4), la concentración de LOA en AS/AP presentó un declive significativo, en tanto que en peces del tratamiento AP/AS, el LOA incrementó siguiendo la misma tendencia de acumulación progresiva observada en AS, alcanzando una concentración de 7.71 y 7.27 mg/g en las semanas 7 y 8, respectivamente. La Figura 5 muestra las ecuaciones polinómicas cúbicas que describen la tendencia de incremento en la concentración de LOA en AP/AS, o de decremento en AS/AP, en las últimas 4 semanas del periodo experimental. Cuando se considera el tratamiento AS durante todo el periodo experimental (8 semanas), la ecuación polinómica que describió mejor la tendencia del LOA fue cuártica (Figura 3).

En el caso del EPA y DHA, en peces alimentados con AP se observó un aumento progresivo durante las primeras tres semanas, momento en que los peces mostraron una concentración en músculo de 0.62 y 3.60 mg/g, respectivamente. Sin embargo, a partir de este momento los niveles de estos ácidos grasos permanecieron relativamente constantes

durante el resto del periodo experimental, con pequeños incrementos o decrementos de una semana a otra pero, generalmente, siempre en cantidades significativamente mayores que en peces alimentados con AS, para quienes la concentración varió alrededor de 0.02 a 0.17 mg/g para EPA, y 0.64 a 1.28 mg/g para DHA a lo largo del estudio (Tablas 8 y 9). Para el tratamiento AS/AP, en la semana 7 se observó la concentración máxima de 0.63 mg/ de EPA y 3.64 mg/g de DHA, posteriormente los valores parecen fluctuar como en AP. Finalmente, en el tratamiento AP/AS, las concentraciones de ambos ácidos grasos tienden a disminuir después del cambio en la dieta (Tabla 9). Las Figuras 6 y 8 muestran las concentraciones de EPA y DHA a lo largo del periodo experimental para los tratamientos AP y AS, respectivamente, mientras que las Figuras 7 y 9 muestran sus concentraciones en los tratamientos AP/AS y AS/AP. Las ecuaciones polinómicas cúbicas que describen la tendencia de incremento o disminución en las últimas 4 semanas del periodo experimental para la concentración de EPA en AS/AP y AP/AS, respectivamente, se muestran en la Figura 10; para el tratamiento AP durante todo el periodo experimental (8 semanas), la ecuación polinómica que mejor describió la tendencia del EPA fue cúbica (Figura 6). En el caso del DHA, las ecuaciones polinómicas que describen la tendencia de incremento o disminución en su concentración, en las últimas 4 semanas del periodo experimental, fue cúbica para AS/AP, mientras que para AP/AS fue cuártica (Figura 11). Cuando se considera todo el periodo experimental (8 semanas), la ecuación polinómica que mejor describe la tendencia del DHA fue cuártica (Figura 8).

La concentración conjunta de EPA y DHA indica que en el régimen de alimentación con AP se requirieron dos semanas para superar la concentración de ingesta diaria recomendada por la OMS de 250 mg de EPA+DHA, observándose una concentración de 267 mg/100 g de filete, mientras que los peces del tratamiento AS no alcanzaron nunca la concentración recomendada (Tabla 10). Por otra parte, los peces del tratamiento AS/AP (Tabla 11), en la semana 5 (1 semana después del cambio de dieta) mostraron un valor de 203 mg/100 g de filete y para la semana 6 ya habían superado la concentración recomendada (250 mg/g), con 341 mg/100 g de filete. En el tratamiento inverso, AP/AS, la concentración disminuyó desde la semana 5. A partir de la suma de los valores semanales de EPA y DHA (Tablas 10 y 11), se estimó que el EPA representa aproximadamente un 15% y el DHA un 85% de dichos valores de concentración conjunta. De manera que, para la predicción de los

250 mg de EPA + DHA, se calculó que el EPA correspondería a 37.5 mg, mientras que el DHA correspondería a 212.5 mg, correspondiendo esta sumatoria al objetivo de concentración recomendada. La predicción de cuánto tiempo (días) se requiere para alcanzar la concentración objetivo se determinó mediante la resolución de las ecuaciones para el tratamiento AS/AP en las últimas 4 semanas del experimento. Para EPA: $y = -0.0267x^3 + 0.4293x^2 - 2.0398x + 3.0497$; si $y = 0.375$ mg/g de EPA, entonces $x = 5.5003$; $P = (5.5003, 0.375)$. Por lo tanto, $5.5003 = 10.5$ días a partir del 1er día de la semana 4. Para DHA: $y = -0.13x^3 + 2.1079x^2 - 10.209x + 16.371$; si $y = 2.125$ mg/g de DHA, entonces $x = 5.3041$; $P = (5.3041, 2.125)$. Por lo tanto, $5.3041 = 9.1$ días a partir del 1er día de la semana 4. Se estimó entonces que la concentración de 250 mg en un filete de 100 gramos de tilapia se logra alcanzar en 10 días, para organismos experimentales de la talla utilizada en este estudio y bajo las condiciones experimentales del presente trabajo.

En cuanto al índices de aterogenicidad (IA), se presentaron valores inferiores en músculo de los peces alimentados con AS (0.56-0.74) en comparación con AP (0.85-1.04), y para AP/AS y AS/AP los valores fueron intermedios (Tablas 10 y 11). Respecto al índice de trombogenicidad (IT), se observó la tendencia inversa, los valores menores se observaron en músculo de peces alimentados con AP (0.18-0.23), en comparación con AS (0.25-0.29), y al igual que para el índice anterior, los valores en AP/AS y AS/AP se encontraron comprendidos entre los límites de los anteriores tratamientos (Tablas 10 y 11).

Tabla 8. Perfil de ácidos grasos del músculo de tilapia del Nilo (*O. niloticus*) alimentada con aceite de pescado (AP) o de soya (AS) durante 4 semanas.

	16:0	18:0	18:1n-9	18:2n-6	18:3n-3	20:4n-6	20:5n-3	22:6n-3	Saturados	Mono-insaturados	PUFA+ HUFA	Total n-3	Total n-6	n-3/n-6
Iniciales	0.71	0.36	0.61	0.23	0.08	0.26	0.12	0.63	1.18	0.76	1.70	1.14	0.54	2.18
Acondicionados	2.07	0.90	2.68	0.55	0.07	0.33	0.04	0.78	0.32	3.49	2.32	1.19	1.11	1.10
Semana 1														
AP	1.68	0.66	1.75	0.74	0.12	0.79	0.18	1.47	2.67	2.31	4.45	2.63	1.75	1.45 ^a
AS	1.20	0.54	1.59	1.68	0.13	0.37	0.02	0.64	1.90	1.85	3.57	1.18	2.38	0.50 ^b
<i>P > F</i>	0.545	0.63	0.841	0.128	0.851	0.105	0.109	0.234	0.538	0.651	0.614	0.255	0.404	0.034
Semana 2														
AP	2.87	0.94	2.78	1.21 ^b	0.16	0.64	0.42 ^a	2.25 ^a	4.57	3.73	6.29	3.92	2.18 ^b	1.80 ^a
AS	2.78	1.19	3.61	4.58 ^a	0.37	0.98	0.08 ^b	1.07 ^b	4.42	3.87	8.96	2.50	6.43 ^a	0.38 ^b
<i>P > F</i>	0.923	0.446	0.500	0.034	0.109	0.109	0.023	0.044	0.922	0.923	0.310	0.205	0.035	<0.001
Semana 3														
AP	3.91	1.33	3.32	1.72	0.20	1.22	0.62 ^a	3.60 ^a	6.29	4.39	10.17	6.63 ^a	3.32	2.00 ^a
AS	2.87	1.38	4.17	6.41	0.50	1.28	0.17 ^b	1.03 ^b	4.61	4.88	11.64	2.79 ^b	8.73	0.35 ^b
<i>P > F</i>	0.306	0.902	0.580	0.107	0.127	0.855	0.011	0.017	0.267	0.759	0.673	0.020	0.116	<0.001
Semana 4														
AP	2.89	0.87	2.68	1.26 ^b	0.14 ^b	0.83	0.46 ^a	2.54	4.66	3.55	7.03	4.65	2.33 ^b	2.00 ^a
AS	3.14	1.30	4.25	6.61 ^a	0.55 ^a	1.04	0.06 ^b	0.93	4.75	4.86	10.93	2.33	8.59 ^a	0.27 ^b
<i>P > F</i>	0.749	0.066	0.165	0.001	0.006	0.300	0.029	0.059	0.938	0.329	0.113	0.138	0.002	<0.001

Los valores son promedios de 3 réplicas. Los promedios para cada ácido graso con superíndices diferentes en cada semana son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$).

Tabla 9. Perfil de ácidos grasos del filete de tilapia del Nilo (*O. niloticus*) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una.

	16:0	18:0	18:1n-9	18:2n-6	18:3n-3	20:4n-6	20:5n-3	22:6n-3	Saturados	Mono-insaturados	PUFA+ HUFA	Total n-3	Total n-6	n-3/n-6
Semana 5														
AP	3.31	1.04	3.03	1.44 ^b	0.18 ^b	1.11	0.56 ^a	3.17 ^a	5.30	3.94	9.08	6.19	2.83 ^b	2.09 ^a
AS	2.49	1.08	3.36	5.73 ^a	0.46 ^a	1.05	0.03 ^b	0.92 ^b	3.90	3.88	9.67	2.16	7.49 ^a	0.29 ^b
AP/AS	2.97	1.08	3.49	4.15 ^{ab}	0.37 ^{ab}	1.00	0.28 ^{ab}	1.97 ^{ab}	4.66	4.26	9.56	3.82	5.75 ^{ab}	0.68 ^b
AS/AP	2.26	0.89	2.24	2.48 ^{ab}	0.20 ^b	1.21	0.22 ^{ab}	1.81 ^{ab}	3.56	2.77	7.51	3.26	4.22 ^{ab}	0.78 ^b
<i>P</i> > <i>F</i>	0.649	0.847	0.595	0.015	0.019	0.802	0.019	0.044	0.614	0.651	0.814	0.145	0.019	<0.001
Semana 6														
AP	1.70 ^b	0.53 ^b	1.47 ^c	0.73 ^c	0.09 ^b	0.67 ^{ab}	0.34 ^b	1.99 ^a	2.70 ^b	1.96 ^c	4.73 ^b	3.13 ^b	1.57 ^b	2.00 ^a
AS	2.66 ^b	0.99 ^a	3.85 ^{ab}	6.99 ^a	0.60 ^a	1.12 ^a	0.03 ^d	0.94 ^b	3.97 ^b	4.43 ^b	10.55 ^a	2.29 ^b	8.26 ^a	0.27 ^c
AP/AS	2.55 ^b	1.00 ^a	3.22 ^{bc}	5.08 ^b	0.42 ^a	0.62 ^b	0.12 ^c	1.10 ^b	3.97 ^b	3.72 ^{bc}	8.21 ^{ab}	2.42 ^b	5.80 ^a	0.43 ^c
AS/AP	4.92 ^a	1.41 ^a	5.62 ^a	4.15 ^b	0.48 ^a	0.76 ^{ab}	0.55 ^a	2.86 ^a	7.80 ^a	7.12 ^a	11.38 ^a	5.30 ^a	6.14 ^a	0.97 ^b
<i>P</i> > <i>F</i>	<0.001	0.001	0.001	<0.001	0.001	0.039	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.010	0.001	0.001	<0.001
Semana 7														
AP	3.38	0.95	3.40	1.51 ^b	0.21 ^b	0.91	0.60 ^a	3.31 ^a	5.41	4.48	8.79 ^b	5.84 ^{ab}	2.86 ^b	2.05 ^a
AS	5.30	2.13	8.71	13.76 ^a	1.26 ^a	1.32	0.05 ^b	1.28 ^b	8.11	9.97	21.39 ^a	4.38 ^{ab}	16.93 ^a	0.26 ^c
AP/AS	3.93	1.45	5.43	7.71 ^{ab}	0.65 ^{ab}	1.28	0.18 ^b	1.96 ^b	5.99	6.36	14.21 ^{ab}	3.88 ^b	10.33 ^{ab}	0.43 ^c
AS/AP	3.97	1.21	4.11	2.99 ^b	0.33 ^b	1.06	0.63 ^a	3.64 ^a	6.30	5.33	11.27 ^{ab}	6.44 ^a	4.75 ^b	1.37 ^b
<i>P</i> > <i>F</i>	0.456	0.060	0.071	0.003	0.005	0.123	<0.001	0.001	0.501	0.127	0.020	0.026	0.003	<0.001
Semana 8														
AP	2.12	0.71	1.88	0.87 ^b	0.09	0.70	0.35 ^{ab}	1.89 ^{ab}	3.35	2.43	5.06	3.16	1.85	1.72 ^a
AS	4.22	1.54	6.71	10.32 ^a	0.89	0.80	0.03 ^b	0.79 ^b	6.40	7.68	15.21	2.56	12.65	0.22 ^c
AP/AS	3.33	1.26	4.67	7.27 ^{ab}	0.70	1.24	0.15 ^b	1.47 ^{ab}	5.06	5.41	12.58	2.96	9.62	0.30 ^c
AS/AP	4.22	1.33	4.71	2.95 ^b	0.33	0.68	0.56 ^a	3.03 ^a	6.95	6.07	10.54	6.00	4.35	1.39 ^b
<i>P</i> > <i>F</i>	0.454	0.364	0.260	0.048	0.083	0.094	0.005	0.015	0.437	0.305	0.228	0.122	0.054	<0.001

Los valores son promedios de 3 réplicas. Los promedios para cada ácido graso con superíndices diferentes en cada semana son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$).

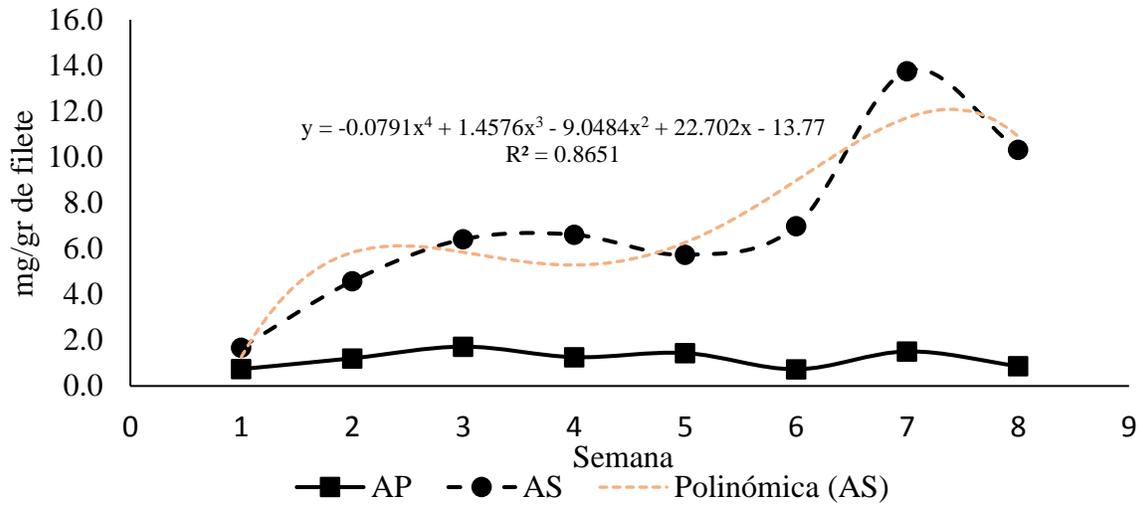


Figura 3. Concentración semanal de LOA (18:2n-6) en el filete de *O. niloticus* alimentada AP o AS durante 8 semanas.

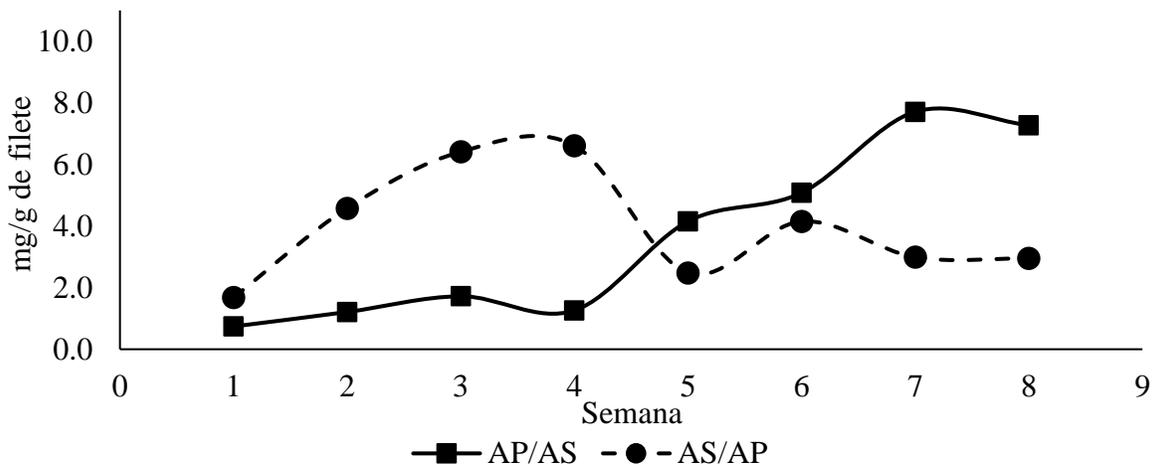


Figura 4. Concentración semanal de LOA (18:2n-6) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP durante 8 semanas.

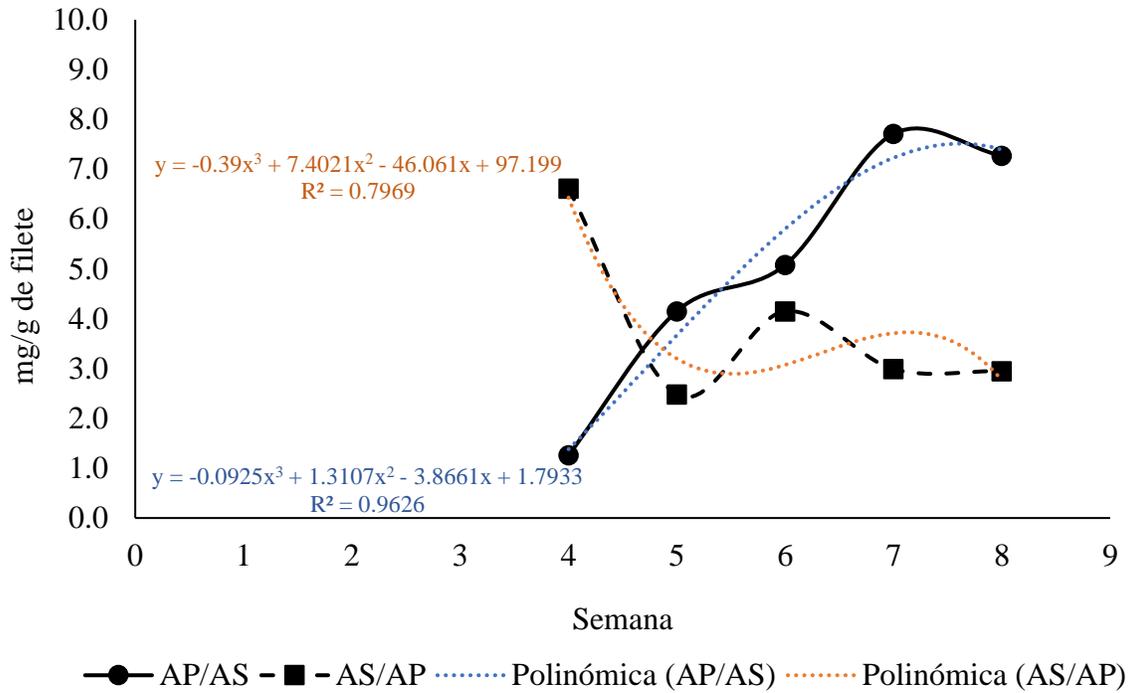


Figura 5. Concentración semanal de LOA (18:2n-6) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP a partir de la semana 4, y ecuaciones polinómicas cúbicas que mejor describen la tendencia de concentración.

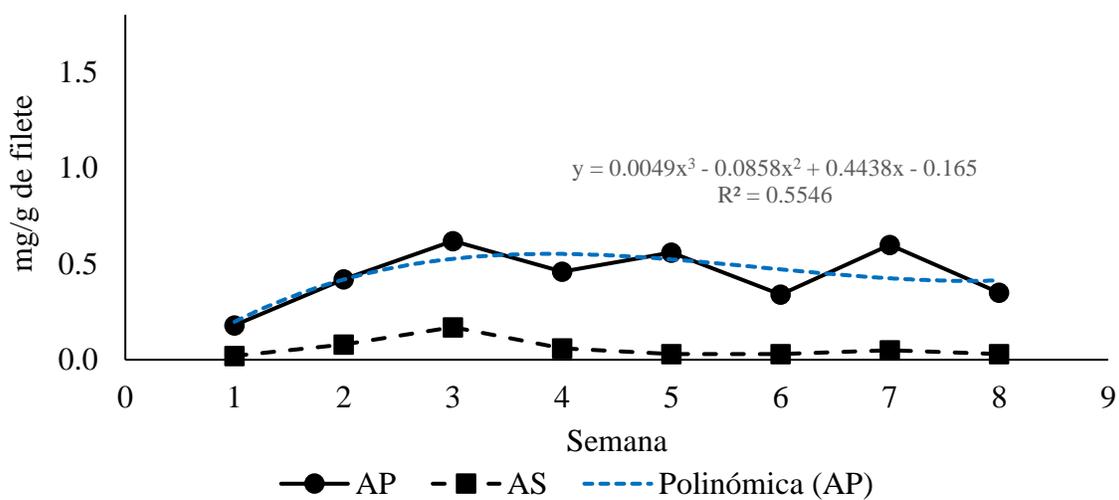


Figura 6. Concentración semanal de EPA (20:5n-3) en el filete de *O. niloticus* alimentada AP o AS durante 8 semanas.

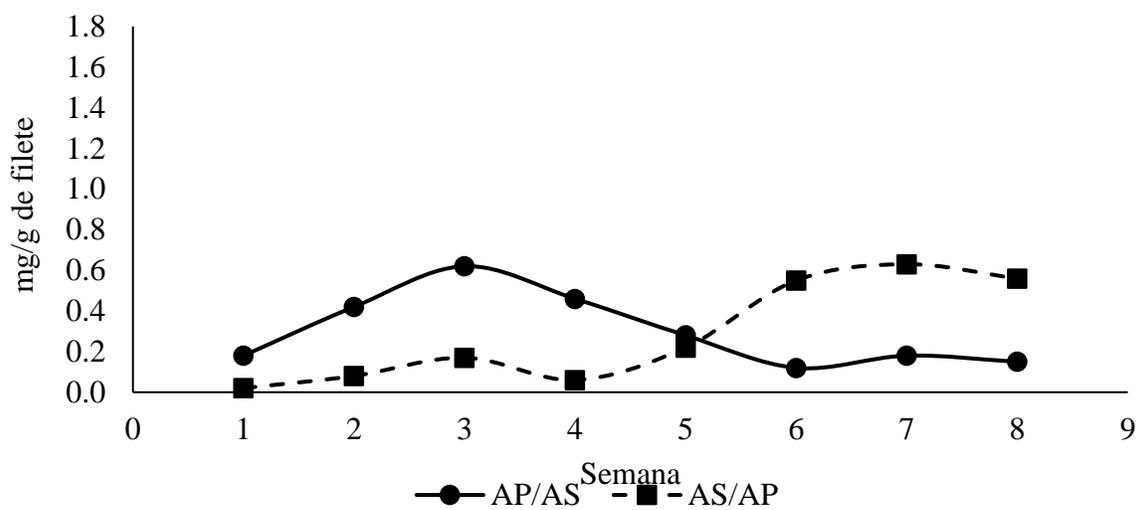


Figura 7. Concentración semanal de EPA (20:5n-3) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP durante 8 semanas.

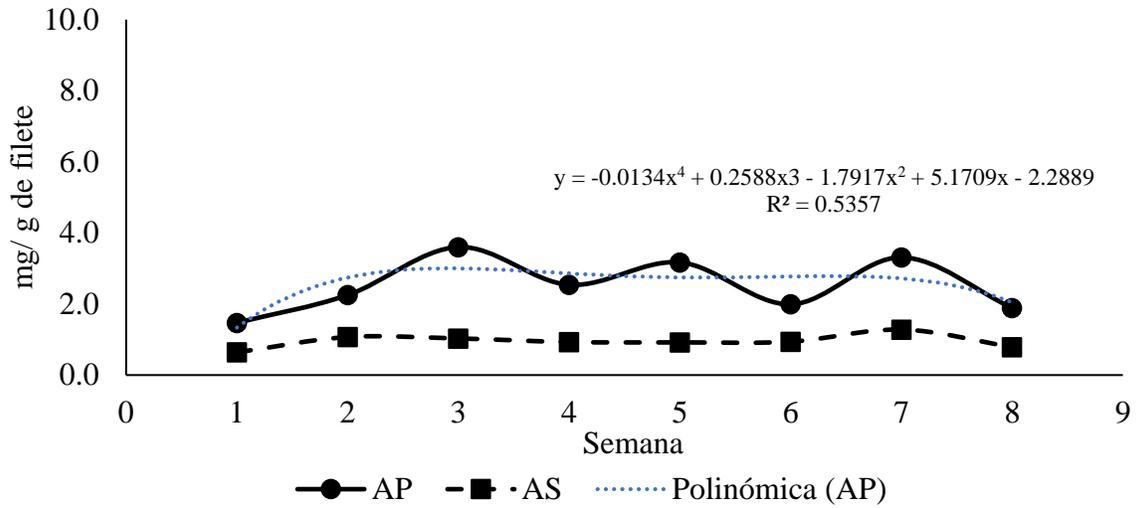


Figura 8. Concentración semanal de DHA (22:6n-3) en el filete de *O. niloticus* alimentada AP o AS durante 8 semanas.

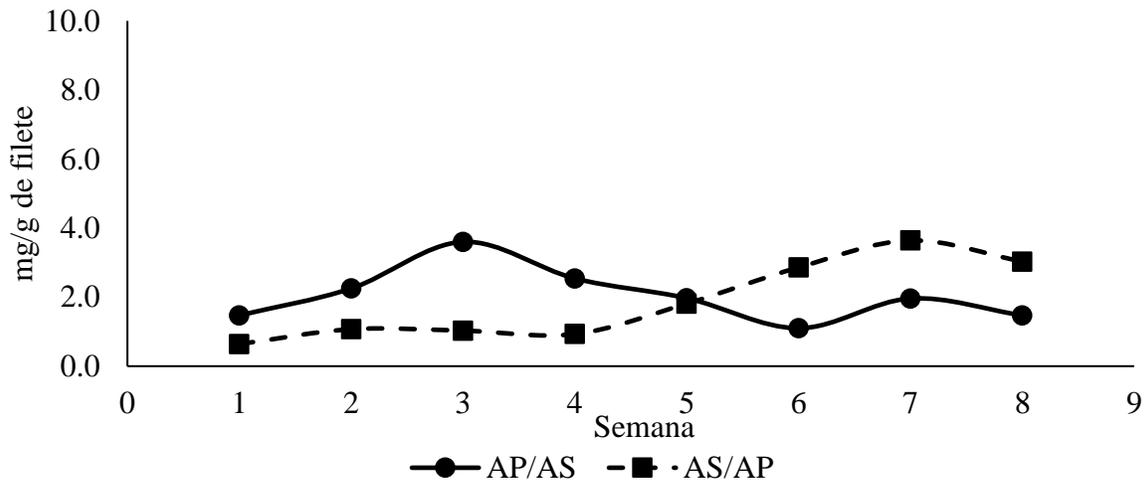


Figura 9. Concentración semanal de DHA en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP durante 8 semanas.

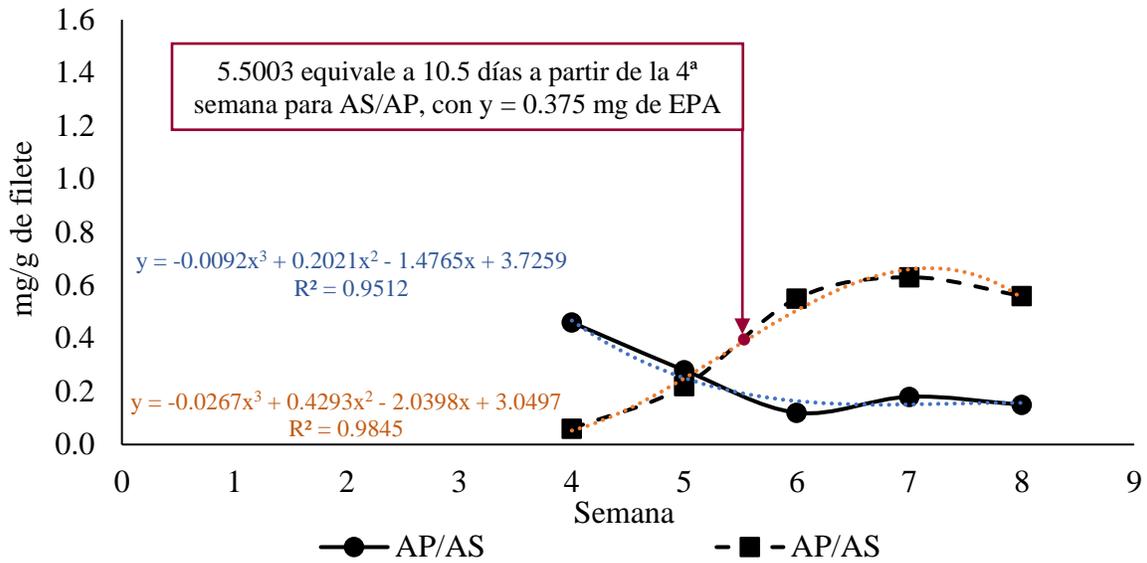


Figura 10. Concentración semanal de EPA (20:5n-3) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP a partir de la semana 4, y ecuaciones polinómicas cúbicas que mejor describen la tendencia de concentración, con la predicción para la concentración nutracéutica mediante la resolución de la ecuación de AS/AP. Para $y = -0.0267x^3 + 0.4293x^2 - 2.0398x + 3.0497$; si $y = 0.375$ mg de EPA, entonces $x = 5.5003$; $P = (5.5003, 0.375)$. Entonces, $5.5003 = 10.5$ días a partir del 1er día de la semana 4.

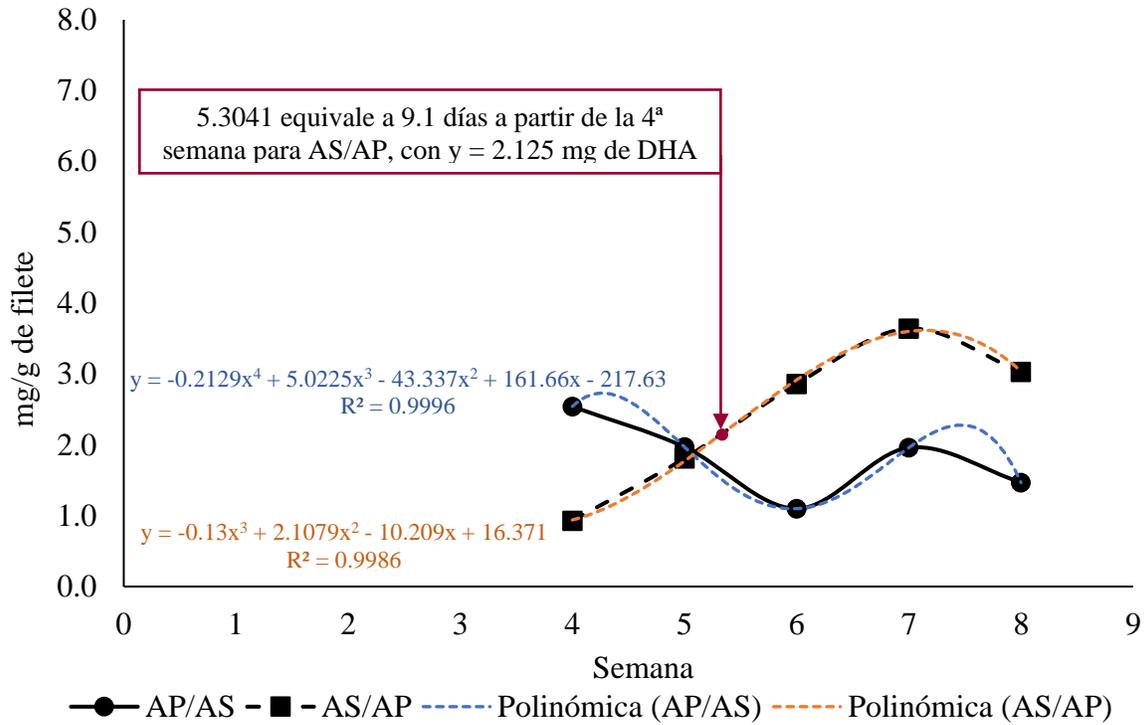


Figura 11. Concentración semanal de DHA (22:6n-3) en el filete de *O. niloticus* bajo el régimen de alimentación AP/AS y AS/AP a partir de la semana 4, y ecuaciones polinómicas cúbica (AS/AP) y cuártica (AP/AS) que mejor describen la tendencia de concentración, con la predicción para la concentración nutracéutica mediante la resolución de la ecuación de AS/AP. Para $y = -0.13x^3 + 2.1079x^2 - 10.209x + 16.371$; si $y = 2.125$ mg de DHA, entonces $x = 5.3041$; $P = (5.3041, 2.125)$. Entonces, $5.3041 = 9.1$ días a partir del 1er día de la semana 4.

Tabla 10. Concentración conjunta de EPA y DHA en mg/100 g de filete de tilapia del Nilo (*O. niloticus*) alimentada con aceite de pescado (AP) o de soya (AS) durante ocho semanas, e índices de aterogenicidad (IA) y trombogenicidad (IT).

	Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4					
	AP	AS	AP	AS	AP	AS	AP	AS				
EPA	18	2	42	8	62	17	46	6				
DHA	147	64	225	107	360	103	254	93				
Total	165	66	267	115	422	120	300	99				
Índices			<i>P>F</i>		<i>P>F</i>		<i>P>F</i>		<i>P>F</i>			
IA	0.85	0.74	0.182	1.03 ^a	0.71 ^b	<0.001	1.01 ^a	0.59 ^b	0.010	1.04 ^a	0.66 ^b	0.003
IT	0.20 ^y	0.26 ^x	0.032	0.23 ^y	0.28 ^x	0.025	0.22	0.25	0.302	0.21 ^y	0.29 ^x	0.008

Tabla 11. Concentración conjunta de EPA y DHA en mg/100 g de filete de tilapia del Nilo (*O. niloticus*) alimentada con aceite de pescado (AP) o soya (AS) por ocho semanas, o alternando la dieta, AP por AS y AS por AP, durante 4 semanas cada una, e índices de aterogenicidad (IA) y trombogenicidad (IT).

	Semana 5				Semana 6				Semana 7				Semana 8							
	AP	AS	AP/AS	AS/AP	AP	AS	AP/AS	AS/AP	AP	AS	AP/AS	AS/AP	AP	AS	AP/AS	AS/AP				
EPA	56	3	28	22	34	3	12	55	60	5	18	63	35	3	15	56				
DHA	317	92	197	181	199	94	110	286	331	128	196	364	189	79	147	303				
Total	373	95	225	203	233	97	122	341	391	133	214	427	224	82	162	359				
Índices					<i>P>F</i>				<i>P>F</i>				<i>P>F</i>				<i>P>F</i>			
IA	0.96 ^a	0.63 ^c	0.75 ^b	0.80 ^b	<0.001	0.95 ^a	0.59 ^c	0.74 ^b	0.95 ^a	<0.001	0.96 ^a	0.56 ^b	0.64 ^b	0.89 ^a	<0.001	1.04 ^a	0.64 ^b	0.64 ^b	0.95 ^a	<0.001
IT	0.19 ^z	0.26 ^x	0.23 ^y	0.22 ^y	<0.001	0.18 ^y	0.25 ^x	0.27 ^x	0.26 ^x	0.001	0.20	0.25	0.23	0.21	0.187	0.22 ^y	0.29 ^x	0.26 ^{xy}	0.23 ^y	0.002

VI. DISCUSION

El consumidor moderno posee una mayor conciencia sobre la calidad de los alimentos que adquiere y consume; este despertar sobre el conocimiento del valor nutricional real de los alimentos y de cómo éste se verá reflejado directamente en la salud, ha tenido un gran apogeo e interés en los últimos años y se observa a simple vista en los comercios, donde la industria alimenticia está obligada a mencionar si sus productos presentan niveles de azúcar, grasas saturadas, sal, etc., que pudieran ser nocivos para la salud humana.

Este mismo principio también se aplica en la acuicultura; hablando específicamente de la grasa, se sabe que el perfil de ácidos grasos del alimento suministrado a un organismo cultivado se ve reflejado directamente su la calidad nutricional. Por ende, cuando esta industria se enfrenta a consumidores más selectivos, se ve en la necesidad de diversificar los productos que ofrece (Oliveira et al., 2021). Por ello se han desarrollado estrategias donde se enriquece el perfil lipídico del filete con dietas ricas en ácidos grasos n-3, principalmente EPA y DHA, para elevar el valor nutricional y comercial de los peces cultivados. De esta manera, los organismos enriquecidos se pueden introducir a mercados especializados donde consumidores selectivos puedan satisfacer su demanda de alimentos nutraceuticos. Es importante mencionar que todo intento de introducción de un producto al mercado debe ir acompañado de un esfuerzo en mercadotecnia para ayudar al éxito comercial del mismo (Abasubong et al., 2018; Suloma et al., 2022).

VI.1. Crecimiento, índices corporales y eficiencia alimenticia

Los resultados obtenidos en esta investigación no mostraron diferencias estadísticas en los índices de rendimiento en crecimiento o corporales, tampoco en eficiencia alimenticia. Ello constituye una evidencia de que las tilapias cultivadas bajo estas condiciones experimentales y durante el periodo de tiempo establecido, tuvieron un desempeño biológico idóneo con ambas fuentes lipídicas, AP y AS. La versatilidad de *O. niloticus* para asimilar lípidos de naturaleza vegetal ha sido ampliamente documentada (Visentainer et al., 2005; Godoy et al., 2019; Ayisi et al., 2019; Toyos-Vargas et al., 2020).

En cuestión del desempeño biológico, en la literatura no se encontraron trabajos donde se haya modificado el lípido dietario y que reporten organismos con una talla inicial semejante a la utilizada en nuestra investigación; sin embargo; en el estudio de Fernandes et al. (2018), quienes utilizaron aceite de maíz e inclusión de distintos niveles dietarios de *Aurantiochytrium* sp. como fuente de EPA y DHA para tilapia del Nilo con talla inicial de 8.35 g, obtuvieron una ganancia diaria de peso de 1.51 g/día con una eficiencia alimenticia de 1.12, valores similares a nuestros resultados. Sin embargo, para la TCE reportaron alrededor de 4.34%/día con inclusiones de 0.5 a 4.0% de la microalga. Sarker et al. (2016) obtuvieron valores de 3.4%/día con otra microalga, *Schizochytrium* sp., en remplazo de AP para tilapia con talla inicial de 1.5 g; nuestras TCE fueron mayores (6.60 a 6.83%/día), con el mayor valor registrado para el tratamiento AS/AP. Es destacable que, el desempeño biológico observado en ésta y en otras investigaciones donde se utilizan ambas fuentes lipídicas, AP y AS, no se observan diferencias estadísticas en el crecimiento para tilapia del Nilo, mencionándose que la proporción de ácidos grasos n-3/n-6 no afecta al rendimiento en crecimiento mientras los organismos se encuentren en un rango de temperatura óptimo, debido a que el requerimiento de PUFAs para un óptimo crecimiento puede ser satisfecho tanto por ácidos grasos n-6 como n-3 sin afectar su desempeño en cultivo (Mufatto et al., 2019; Lim et al., 2011; Suloma et al., 2022), lo cual se confirmó con nuestros resultados.

Por otra parte, la similitud observada en los valores del índice hepatosomático para todos los tratamientos (1.48-1.89%) refleja que las fuentes lipídicas dietarias fueron bien aceptadas y mantuvieron consistente la apariencia y peso hepático, sin que el cambio en el aceite de pescado/aceite de soya (o viceversa) a mitad del cultivo influyera en la condición del órgano o su función en la utilización metabólica del lípido dietario. Estos resultados coinciden con valores reportados por Stoneham et al. (2018), 1.52-1.61%, al alimentar tilapia con AP (1-5% de la dieta), o 1.61-1.71% con *Schizochytrium* sp. (1.75%-8.77% de la dieta). El factor de condición, que osciló entre 2.25-2.43, valores superiores a 1.0, son evidencia de un buen estado de salud en peces e indican un crecimiento proporcional entre longitud y peso, lo cual es deseable en la piscicultura (Delgadillo-Calvillo et al., 2012).

VI.2. Composición proximal

La composición proximal de los peces experimentales no se vio afectada por el cambio de fuente lipídica dietaria durante el tiempo que duró el experimento; las estimaciones para los organismos muestreados semanalmente no mostraron diferencias para todos los tratamientos, excepto para proteína cruda en la semana 3 entre los peces de los tratamientos AP (22.58%) y AS (21.39%); sin embargo, desde el punto de vista biológico o fisiológico, dicha diferencia no representa un cambio radical para los organismos en cultivo; la diferencia estadística detectada puede más bien atribuirse a la sensibilidad estadística de valores muy semejantes entre las réplicas. Suloma et al. (2022) tampoco reportaron diferencias en la composición proximal de tilapia en respuesta al cambio de lípido dietario, utilizando las mismas fuentes (AP y AS) que en este estudio. Godoy et al. (2019) reportaron un porcentaje de humedad de 76.6%, 18.1% de proteína cruda, 3.8% de grasa y 1.1% de ceniza para peces alimentados con aceite de soya al 15% de la dieta y mencionan que el uso de una proporción superior de aceite vegetal altera los niveles de proteína y grasa crudas, mientras que las proporciones de humedad y ceniza del filete no se ven afectadas. Las formulaciones experimentales para AP y AS en este estudio se diseñaron para un contenido de 14% de grasa cruda y mostraron valores entre 14 y 15%, que es indicativo de una correcta formulación, y que adicionalmente hace evidente la correspondencia con resultados ya reportados en la literatura.

VI.3. Perfil de ácidos grasos

Debido a que este proyecto aporta una nueva perspectiva sobre el estudio del cambio en el perfil de ácidos grasos del músculo de tilapia del Nilo al evaluar semanalmente la concentración de EPA + DHA, con la finalidad de alcanzar la concentración recomendada por la OMS de 250 mg, que extrapolamos a un filete de 100 g de peso, se hizo evidente que no es posible comparar en forma directa estos hallazgos con los resultados de estudios previos. La principal razón es que en el presente estudio se examina la variación gradual de los ácidos grasos en el tiempo, mientras que en estudios previos se ofrecen únicamente concentraciones puntuales de ácidos grasos al final de estos, aunque sí es posible hacer observaciones y comparaciones generales un poco más precisas con algunos pocos estudios parecidos.

No fue sorprendente confirmar que el perfil de ácidos grasos del aceite utilizado en las dietas influyó directamente el perfil del músculo de *O. niloticus*, principalmente para tres ácidos grasos, el LOA que es mayoritario en aceite de soya, y de los ácidos EPA y DHA que son característicos del aceite de pescado. Esta respuesta es bien conocida y ha sido reportada para especies de peces de agua dulce, peces marinos, e incluso en crustáceos. El aceite de soya posee gran cantidad de LOA, aproximadamente un 54% del total de ácidos grasos (Walsh, 2007), y el de pescado cerca de un 20.66% de EPA y 12.87% de DHA del total de ácidos grasos (Gámez-Meza et al., 1999), aunque las concentraciones pueden variar dependiendo de la época del año, el tipo de alimento disponible y también dependen considerablemente de la especie de pez del que provenga el aceite.

La concentración más alta de LOA se observó para el tratamiento AS en la semana 7 con 13.76 mg/g de filete y se redujo en la semana 8 a 10.32 mg/g, pero en general se aprecia un aparente proceso consistente de acumulación hasta la semana 7. Comparativamente, la concentración de DHA en peces alimentados con AP osciló entre 1.47 y 3.60 mg y también ilustra un incremento en las primeras semanas, seguido de fluctuaciones semanales, pero de poca magnitud, que parece ser indicativo de procesos de acumulación y/o biosíntesis, seguido de su utilización como recurso biosintético para otros procesos. El EPA tuvo el mismo comportamiento que el DHA en este mismo tratamiento, pero en concentraciones más pequeñas que oscilaron entre 0.18 y 0.60 mg/g, y se sabe que una gran parte del contenido de EPA se aprovecha para la biosíntesis de DHA (Monroig et al., 2011). Ambos, EPA y DHA, son fundamentales para diversos procesos metabólicos y fisiológicos, por ejemplo como precursores de mediadores de lipídicos (eicosanoides), entre los que se encuentra la estimulación de la agregación plaquetaria o funciones como reguladores transcripcionales, moduladores de las funciones de las proteínas de membrana, la síntesis de fosfolípidos cerebrales, o la maduración de órganos sexuales, entre otros (Hishikawa et al., 2017; Tocher, 2010; Simopoulos et al., 2008; Sanhueza et al., 2004), de manera que el uso de EPA y DHA es constante, impidiendo su posible acumulación en filete. Contrariamente, el LOA no parece oscilar drásticamente, sino más bien parece acumularse, al menos hasta la semana 7, como se mencionó. Godoy et al. (2019) utilizaron dietas con 15% de AS para *O. niloticus* y reportaron una concentración de 10.24 mg/g después de 50 días de alimentación en peces de 400 g, que es comparable con nuestros valores.

Es importante reiterar que el LOA también es sustrato para la biosíntesis de otros LC-PUFAs n-6 como el ARA (20:4n-6) y éste, a su vez, es necesario para la biosíntesis de otras moléculas con funciones biológicas importantes (eicosanoides) (Hanna y Aziz, 2018). Los valores de ARA en el tratamiento AS oscilaron aproximadamente entre 0.37 y 1.32 mg/g, sin diferencias significativas relevantes a lo largo del periodo experimental, y que concuerdan con la concentración reportada por Suloma et al. (2022) de 1.30 mg/g con AS al 10% en la dieta de tilapia. También coincide con valores reportados para otros peces de agua dulce alimentados con AS, como el de la Cachama roja (*Piaractus brachypomus*) (Vásquez et al., 2019) con 1.38 mg/g, o de 1.69 mg/g para la carpa herbívora (*C. idella*) (Liu et al., 2022). Estos valores parecen indicar que el requerimiento de LOA para síntesis de ARA se satisface en exceso al alimentar a peces de agua dulce con AS a niveles de inclusión semejantes a los de este estudio. No obstante, los niveles de ARA en tejido no parecen replicar la tendencia de acumulación que sigue el LOA, su concentración parece estar limitada por la capacidad biosintética de la tilapia, pero también por su utilización en procesos biosintéticos. El LOA puede ser un sustrato energético para β -oxidación, especialmente cuando está disponible en concentraciones importantes en el aceite de soya, pero estando presentes otros ácidos grasos saturados y monoinsaturados también disponibles en este aceite que son sustratos preferenciales para β -oxidación, es concebible que ésta sea una de las razones que explican su aparente acumulación en el músculo de esta especie.

Los peces alimentados con AP presentaron valores de LOA que oscilaron entre 0.74 y 1.72 mg/g, dado que el AP tiene baja concentración de este ácido graso; los 26.11 mg/g detectados en esta dieta son mayormente contribución de las harinas e ingredientes de origen vegetal en la formulación. Ahora bien, los valores de ARA variaron poco entre los tratamientos AP y AS a lo largo del periodo experimental, lo cual indica que el contenido de LOA en la dieta AP fue suficiente para satisfacer el requerimiento de ARA, que pudo ser obtenido parcialmente mediante el proceso biosintético de desaturación y elongación de LOA, pero también el ARA está presente en el aceite de pescado en baja concentración. Kanazawa et al. (1980) mencionan que la demanda de LOA para la tilapia zilli (*Coptodon zillii*), una especie emparentada con *O. niloticus*, se puede satisfacer con la inclusión dietaria de 1.0% en la dieta, por ende, este requerimiento se satisfizo en ambas dietas, AP y AS.

Por su parte, los peces del tratamiento AS obtuvieron valores inferiores de EPA y DHA debido a la mínima concentración de estos ácidos grasos en la dieta experimental, 1.23 y 1.77 mg/g, respectivamente, pero también presentó 26.11 mg/g de LNA, el cual se encuentra generalmente en el aceite de soya en una concentración de 8% (Walsh, 2007). Es evidente que el LNA funcionó como sustrato para la obtención de EPA y DHA (Monroig et al., 2011). El requerimiento de LNA para Tilapia del Nilo recomendado para juveniles de *O. niloticus* es de 0.45-0.64% del peso seco de la dieta (Chen et al., 2013), dicho requerimiento se satisfizo en las dietas formuladas con AS.

La concentración de EPA y DHA en músculo de peces del tratamiento AS/AP, a partir del cambio de dieta, alcanzó la concentración deseada (250 mg/ 100 g de filete) después de solo 2 semanas, no de 3 como en el tratamiento AP al inicio del experimento. En peces y crustáceos se observa “crecimiento compensatorio” cuando se ha privado de un nutriente específico o se impone una restricción alimenticia durante un periodo de tiempo determinado, pero en el momento que se suministra nuevamente, los organismos parecen aprovechar de una manera más eficiente el alimento, incluso se promueve una aceleración en el crecimiento que puede superar al grupo control (Kim y Lovell, 1995; Py et al., 2022). Este mecanismo pudiera explicar la más rápida y mayor concentración de HUFAs en el tratamiento AS/AP, que careció del suministro de DHA y EPA por 4 semanas, para luego recibirlos e incorporarlos más eficientemente en músculo alcanzando una mayor concentración en un periodo más corto de tiempo, y aunque no fue estadísticamente superior, una mayor ganancia en peso comparado con el resto de los tratamientos.

A partir de la semana 4, cuando se realizó el cambio en las dietas AP/AS y AS/AP, se observó el cambio en las concentraciones de ácidos grasos, que se homogenizaron temporalmente antes de volver a divergir. Esto fue muy evidente para EPA y DHA en la semana 5 y para LOA en la semana 6. Suloma et al. (2022) reportaron que un periodo de depuración de 6 semanas disminuye eficazmente los niveles de LOA en el filete de tilapia del Nilo. No obstante, el principal objetivo de esta investigación fue precisamente, a partir de este cambio introducido en la semana 4, encontrar el tiempo que le toma a *O. niloticus* alcanzar la concentración recomendada de EPA + DHA para consumo humano, 250 mg al día, una vez que se realizó el cambio en la fuente de lípido dietario. Se esclareció que, en dos semanas, en organismos de esta talla experimental se supera esta concentración, alcanzando

341 mg/100 g de filete. Mediante las ecuaciones polinómicas determinadas, se estimó que los 250 mg/100 g se alcanzarán en alrededor de 10 días de alimentación con la dieta a base de AP, que es un tiempo corto. En general, las dietas de terminación suelen ofrecerse por periodos que varían de 4 a 10 semanas, dependiendo de la especie (Glencross et al., 2003; Godoy et al., 2019; Stoneham et al., 2018), pero particularmente de las prácticas de manejo en granja.

Uno de los principales antecedentes de enriquecimiento con LC-PUFA n-3 para esta especie es el estudio de Stoneham et al. (2018), quienes utilizaron dos fuentes lipídicas, AP y harina de la microalga (HM) *Schizochytrium* sp. en organismos con 157.9 g de peso inicial. El perfil de lípidos se evaluó al inicio, después de 4 semanas y después de 8 semanas. En la semana 4 observaron una concentración de 18.9 mg/113 g de filete y 97.3 mg/113 g para EPA y DHA, respectivamente, en peces alimentados con AP al 5% de inclusión, mientras que con la HM detectaron 7.2 mg/113 g y 213.9/113 g de EPA y DHA, respectivamente.

En nuestra investigación, después de 4 semanas se obtuvo un contenido de 46 mg/100 g de filete para EPA, mientras que para el DHA un total de 254 mg/100 g en peces alimentados con AP, superando los valores reportados por dichos autores. Las razones que explican esta diferencia es que nuestra dieta se formuló para tener un contenido de lípido total de 14%, que incluyó 12.53% de AP, mientras que la dieta con 5% de AP de Stoneham et al. (2018) se formuló para un contenido de 9.5% de lípido total, con 5% de AP y 1.3% de aceite de maíz. De manera que el mayor contenido de lípido dietario total y de inclusión de AP pueden explicar la más rápida acumulación de EPA y DHA en el filete. No debe pasar desapercibida la discrepancia en la talla inicial de tilapias utilizada en ambos estudios que, en principio, explica las diferencias en las formulaciones para satisfacer requerimientos de lípido para cada talla. Adicionalmente, es bien sabido que la tasa de crecimiento diario es mayor en organismos pequeños (como los de este estudio) y disminuye al crecer (como en el estudio referido), por lo que también se reduce la tasa de síntesis de tejidos que utiliza el lípido disponible en la dieta, y que se verá reflejado en el perfil de ácidos grasos del nuevo músculo sintetizado por los peces. Es importante también notar las unidades, que en nuestro estudio se expresan por 100 g de filete, mientras que el de Stoneham et al. (2018) el filete es de 113 g, sus concentraciones serían un poco menores si se expresaran por filete de 100 g.

Los resultados obtenidos por Stoneham et al. (2018) para la semana 8 de cultivo muestran valores para EPA de 36.7 mg/113 g de filete y para DHA 205.6 mg/113 g con aceite de pescado, dando un resultado conjunto de 242.3 mg/113 g, acercándose bastante a la concentración recomendada por la OMS, mientras que para peces alimentados con HM obtuvieron 9.2 y 366.4 mg/113 g, respectivamente, con una sumatoria fue de 375.6 mg/113 g, que supera la concentración recomendada por la OMS; sin embargo, requirió de un tiempo más prolongado.

El uso de aceite de HM en dietas acuícolas ha demostrado ser un excelente sustituto teórico para el AP, pero sus costos de producción son elevados y su implementación actual para usarse en dietas acuícolas no es todavía rentable (Maldonado-Othon et al., 2020). Nuevamente, enfatizamos que la diferencia en la talla inicial de organismos en ambos estudios juega un papel muy importante en la tasa de cambio del perfil de ácidos grasos. Otra especie adicional donde se ha evaluado el enriquecimiento del filete es la carpa común (*C. carpio*), alimentada por un periodo de 30 días con dietas a base de AP al 7% de inclusión, en la que se alcanzó una concentración de 3.8 y 10.1 mg/g de peso seco de músculo para EPA y DHA, respectivamente (Schultz et al., 2015), pero en vista de que el músculo tiene alrededor de 75% de humedad, en peso húmedo las concentraciones reportadas disminuirán sensiblemente.

Por último, el IA y el IT valoran la capacidad de un alimento para prevenir procesos inflamatorios y de trombogenicidad arterial (IT), así como vaso activos, arritmogénicos y predictivos de enfermedades cardiovasculares (IA) según la composición lipídica. Cuanto más bajos son estos índices en los alimentos consumidos, mejor se valora el alimento (Dubnov-Raz y Berry, 2008). Nuestros resultados indican una buena calidad alimenticia del filete de *O. niloticus*, tanto para peces alimentados con AP (IA: 0.85-1.04; IT: 0.18-0.23), como para aquellos alimentados con AS (IA: 0.56-0.74; IT: 0.25-0.29). Los valores son similares a valores reportados para un pez marino, como el caso de totoaba (*Totoaba macdonaldi*), para la que se ha reportado un IA de 0.62 y un IT de 0.13 cuando se alimentó por 6 semanas con AP, o bien, un IA de 0.95 y un IT de 0.23 cuando se alimentó con AS (Maldonado-Othón et al., 2020).

Cuando se comparan estos índices con otros alimentos de origen animal, e.g., carne de cerdo, IA: 0.52 e IT: 1.23 (Razmaite et al., 2011), carne de pechuga de pollo, IA: 0.55 e IT: 0.55 (Laudadio y Tufarelli, 2010), o derivados lácteos como el queso Mozzarella de leche entera, AI: 16.7 e TI: 14.1, o mantequilla, AI: 2.9 e IT: 3.4 (Lourenço et al., 2021), es claro que el consumo del filete de tilapia tiene un perfil nutricional que pudiera contribuir a la prevención de padecimientos cardiovasculares (Ulbricht and Southgate, 1991), especialmente un filete que satisface el requerimiento diario de 250 mg de EPA + DHA recomendado por la OMS después de haber cambiado su perfil de ácidos grasos.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que la tilapia del Nilo, cultivada bajo estas condiciones experimentales, puede tener un desempeño biológico idóneo y similar con ambas fuentes lipídicas, aceite de pescado y aceite de soya, confirmando su versatilidad para utilizar eficientemente lípidos de distinta naturaleza. Estas fuentes de lípido no causaron cambios en la composición proximal del filete; sin embargo, el perfil de ácidos grasos del aceite utilizado en las dietas influyó directamente el perfil de ácidos grasos del filete de *O. niloticus* principalmente para tres ácidos grasos, LOA, EPA y DHA. Se confirmó que es posible enriquecer el filete y alcanzar la concentración de 250 mg de EPA + DHA en una porción de 100 g de filete en solamente 10 días, esto para peces de la talla utilizada en este estudio. Se confirmó también que el filete de tilapia alimentada con aceite de soya o de pescado tiene un perfil nutricional que puede contribuir a la prevención de padecimientos cardiovasculares, especialmente un filete que satisface el requerimiento diario de 250 mg de EPA + DHA recomendado por la OMS después de haber cambiado su perfil de ácidos grasos.

VIII. RECOMENDACIONES

- Implementar el mismo diseño experimental en organismos cercanos a la talla comercial para estimar la tasa de cambio del perfil de ácidos grasos en esa talla.
- En peces de talla comercial, evaluar el perfil lipídico de remanentes viscerales, corporales y de la piel de organismos enriquecidos para establecer su posible valor comercial, además de evaluar la utilización práctica de esos subproductos.
- Complementar el estudio con estimaciones económicas de costo/beneficio para el enriquecimiento y comercialización de filete de tilapia nutracéutico enriquecido con LC-PUFA de la familia n-3.

IX. LITERATURA CITADA

- Abasubong, K. P, X. li, D. D. Zhang, E. T. jia, Y. Xiang, C. Xu y W. B. Liu. 2018. Dietary supplementation of xylooligosaccharides benefits the growth performance and lipid metabolism of common carp (*Cyprinus carpio*) fed high-fat diets. *Aquaculture Nutrition*. 24:1416-1424.
- Afshan, S. A., A. Uzma, F. Mujahid, A. B. Saima, H. Fakhir y A. Rehan. 2014. Effect of Different Heavy Metal Pollution on Fish. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*. 2:74-79.
- Akbar, M., F. Calderón, Z. Wen y H. Kim. 2005. Docosahexaenoic acid: a positive modulator of Akt signaling in neuronal survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi: 10.1073/pnas.0502903102
- Aldaí, N., A. I. Nájera, K. y Osara. 2003. Métodos de reprivatización de ácidos grasos para la determinación de los linoleico conjugados en carne. *Información Técnica Económica Agraria* 1:94-96.
- Almeida, V. V., F. Carbonera, P. Fernandes-Montanher, A. P. Lopes, M. Matsushita y J. Vergílio-Visentainer. 2015. Incorporation of Alpha-Linolenic Acid and Enhancement of n-3 Fatty Acids in Nile Tilapia: a Factorial Design. *Journal of the American Oil Chemists Society* 92:693-700.
- Almeida, V. V., F. Carbonera, P. Fernandes-Montanher, A. P. Lopes, M. Matsushita y J. Vergílio-Visentainer. 2014. Effect of Dietary Replacement of Soybean Oil with Different Sources of Gamma-Linolenic Acid on Fatty Acid Composition of Nile Tilapia. *Journal of the American Oil Chemists Society* 92:225-231.
- Arrazola, A. 1994. Biología de la membrana celular. *Nefrología* 14:418-426.
- Arredondo, F. y G. Lozano. 1996. El cultivo de la tilapia en México. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma Metropolitana. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Primer Curso de Cultivo de Producción de Tilapia. 20 al 22 de junio. 7-18.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2005. Official Methods of Analysis. Association of Analytical Chemists, Arlington, VA, USA.
- Ayisi, C., J. Zhao, C. Yame, A. Apraku y G. Debra. 2019. Effects of replacing fish oil with palm oil in diets of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) on muscle biochemical composition, enzyme activities, and mRNA expression of growth-related genes. *Fisheries and Aquatic Sciences*. doi: 10.1186/s41240-019-0139-y
- Balasz, J. C y L. Tort. 2019. Netting the Stress Responses in Fish. *Frontiers in Endocrinology* 12:10-62.
- Ballester-Lozano, G., L. Benedito-Palos, J. C. Navarro, S. Kaushik, J. Pérez-Sánchez. 2011. Prediction of fillet fatty acid composition of market-size gilthead sea bream (*Sparus aurata*) using a regression modelling approach. *Aquaculture* 319:81-88.
- Bell, J. G., D. R. Tocher, B. M. Farndale, D. Cox, R. McKinney, J. R Sargent. 1997. El efecto de los lípidos de la dieta sobre el metabolismo de los ácidos grasos poliinsaturados en el

- salmón del Atlántico (*Salmo salar*) que experimenta la transformación de parr-smolt. *Lipids* 32:515-525.
- Bell, J. G., R. J. Henderson, D. R. Tocher y J. R. Sargent. 2004. Replacement of dietary fish oil with increasing levels of linseed oil: Modification of flesh fatty acid compositions in Atlantic salmon (*Salmo salar*) using a fish oil finishing diet. *Lipids* 39:223-232.
- Bhujel, R. 2000. A review of strategies for the management of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodfish in seed production systems, especially hapa-based systems. *Aquaculture* 181:37-59.
- Bordignon, F., A. Trocinoa, E. Sturaro, S. Martínez-Llorens, A. Tomas-Vidal, G. Xiccato y M. Berton. 2023. Fish oil substitution with vegetable oils in diets for greater amberjack (*Seriola dumerili*): A consequential life cycle assessment approach. *Aquaculture*. doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738903
- Bradbury, J. 2011. Docosahexaenoic acid (DHA): an ancient nutrient for the modern human brain. *Nutrients*. *Nutrients*. 3:529-54.
- Burr, M. L., A. M. Fehily y J. F. Gilbert. 1989. Effects of changes in fat, fish, and fibre intakes on death and myocardial reinfarction: diet and reinfarction trial (DART). *Lancet* 2:757-61.
- Cabezas-Zábala, C., B. Hernández-Torres y M. Vargas-Zárate. 2016. Aceites y grasas: efectos en la salud y regulación mundial. *Revista de Facultad Medica*. 64:761-8.
- Carvajal, C. 2019. Lípidos, lipoproteínas y aterogénesis. EDNASSS-CCSS. San José, Costa Rica.
- Castillo-Campo, L. F. 2004. Producción mundial de tilapia: ¿quiénes son los verdaderos líderes? *Panorama Acuícola Magazine* 9:56-57.
- Castro, T. y V. Balaszczuk. 2020. Efectos del omega 3 ante el deterioro cognitivo. *Revista Argentina de Neuropsicología* 37:44-60.
- Ceballos, O. y E. Velázquez. 1988. Perfiles de la alimentación de peces y crustáceos en los centros y unidades de producción acuícola en México. *AQUILA*. Apoyo a las Actividades Regionales de Acuicultura para América Latina y el Caribe.
- Celestino, H. M., M. Fernandes, E. Guntendorfer, C. A. Lopes, M. Matsushita, J. Vergilio y R. Pereira. 2014. Influence of a Diet Enriched with Perilla Seed Bran on the Composition of Omega-3 Fatty Acid in Nile Tilapia. *Journal of the American Oil Chemists Society* 91:1939-1948.
- Chen, C., B. Sun, X. Li, P. Li, W. Guan, Y. Bi y Q. Pan. 2013. N-3 essential fatty acids in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*: Quantification of optimum requirement of dietary linolenic acid in juvenile fish. *Aquaculture* 416:99-104.
- Colter, A. L., C. Cutler y K. A. Meckling. 2008. Fatty acid status and behavioural symptoms of attention deficit hyperactivity disorder in adolescents: A case-control study. *Nutrition Journal* 28:70-87.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2014. Ponderación de Invasividad de Especies Exóticas en México (SIEI) *Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758.

- Coronado, H. M., L. S. Vega y T. R. Gutiérrez. 2006. Los ácidos grasos omega-3 y omega-6: Nutrición, bioquímica y salud. *Revista de Educación Bioquímica* 25:72-79.
- Costa, B. H. M., Celestino, P. Fernandes, J. Schuelter, V. de Cinque y J. Vergílio. 2014. Incorporation of Omega-3 Fatty Acids in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fed Chia (*Salvia hispanica* L.). *Bran* 91:429-437.
- Creative Proteomics, 2023. Medium-chain and long-chain fatty acids analysis services. Acceso en línea: 29 de junio de 2023. [https://www.creative-proteomics.com/services/medium-chain-and-long-chain-fatty-acids-analysis-service.htm #:~:text=Fatty%20acids%20can%20be%20](https://www.creative-proteomics.com/services/medium-chain-and-long-chain-fatty-acids-analysis-service.htm#:~:text=Fatty%20acids%20can%20be%20)
- Dávila-Torres, J., J. J. González-Izquierdo, A. Barrera-Cruz. 2015. Panorama de la obesidad en México. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social* 53:241-249.
- Delgadillo-Calvillo, A. C., C. A. Martínez-Palacios, J. M. Berruecos-Villalobos. 2012. Caracterización de la curva de crecimiento en dos especies de pez blanco *Chirostoma estor*, *C. promelas* y sus híbridos. *Veterinaria Mexicana* 43:113-121.
- Devassy, J. G, S. Leng, M. Gabbs, M. Monirujjaman, H. M. Aukema. 2016. Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Oxylipins in Neuroinflammation and Management of Alzheimer Disease. *Advances in Nutrition*.15:905-16.
- Dubnov-Raz, G y E. Berry. 2008. The Dietary Treatment of Obesity. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America* 37: 873–886.
- Dyall, S. 2015. Long-chain omega-3 fatty acids and the brain: a review of the independent and shared effects of EPA, DPA and DHA. *Frontiers in Aging Neurosciences*. doi: 10.3389/fnagi.2015.00052
- FAO, 2009. *Oreochromis niloticus*. Fichas técnicas de especies acuáticas cultivadas. Texto de J. E. Raocy, Editado y compilado por Valerio Crespi y Michael New.
- FAO, 2010. Fats and fatty acids in human nutrition - Report of an expert consultation. FAO Food and Nutrition Paper 91, Rome, Italy, 166 pp.
- FAO, 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Department, Roma, Italia.
- Fernandes, C., R. Oselame, J. Block y D. Machado. 2018. Mixes of plant oils as fish oil substitutes for Nile tilapia at optimal and cold suboptimal temperature. *Aquaculture* 497:82-90.
- Gómez-Meza, N., I. Higuera-Ciapara, A. M. Calderon de la Barca, L. Vázquez-Moreno, J. Noriega-Rodríguez y O. Angulo-Guerrero. 1999. Seasonal variation in the fatty acid composition and quality of sardine oil from *Sardinops sagax caeruleus* of the Gulf of California. *Lipids* 34:639-642.
- Gladyshev, M., A. Makhrov, N. Nadezhda, N. Sushchik. E. Makhutova, D. Rudchenko, E. V. Balashov y V. Evgenii. 2022. Differences in composition and fatty acid contents of different rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) strains in similar and contrasting rearing conditions. *Aquaculture* 556. doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738265

- Glencross, B. D., W. E. Hawkins y J. G. Curnow. 2003. Restoration of the fatty acid composition of red seabream (*Pagrus auratus*) using a fish oil finishing diet after grow-out on plant oil based diets. *Aquaculture Nutrition* 9:409-418.
- Godoy, A. C., O. Oliveira, J. H. Oxford, I. Meloc, R. Batista, D. Neuc, R. V. Nunes y W. R. Boscoloc. 2019. Soybean oil for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in finishing diets: Economic, zootechnical and nutritional meat improvements. *Aquaculture* 512:734324.
- Halver, J. E. y R. W. Hardy. 2002. Fish Nutrition. en Sargent, J.R., Tocher, D.R. and Bell, G., Eds., *The Lipids*, tercera edicion. Edition, Academic Press, California, 182-246.
- Hanna, V. y E. A. Aziz. 2018. Synopsis of arachidonic acid metabolism: A review. *Journal of Advanced Research* 11:23-32.
- Hanssens, L., I. Thiébaud, N. Lefèvre, A. Malfroot, C. Knoop y J. Duchateau. 2016. The clinical benefits of long-term supplementation with omega-3 fatty acids in cystic fibrosis patients - A pilot study. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids* 108:45-50.
- Hastings, N., M. Agaba, D. R. Tocher, M. J. Leaver, J. R. Dick, J. R. Sargent y A. J Teale. 2001. A vertebrate fatty acid desaturase with delta 5 and delta 6 activities. *The Proceedings of the National Academy of Sciences* 98:14304.
- Hishikawa, D., W. J. Valentine, Y. Iizuka-Hishikawa, H. Shindou, y T. Shimizu. 2017. Metabolism and functions of docosahexaenoic acid-containing membrane glycerophospholipids.
- Hohenwarter, M., Borchers, M., Ancsin, G., Bencze, B., Blossier, M., Elias, J., Frank, K., Gal, L., Hofstatter, A., Jordan, F., Konevcny, Z., Kovacs, Z., Letner, E., Lizenfelner, S., Parisse, B., Solyom-Gecse, C., Stadbauer, C., Tomaschko, M., 2018. GeoGebra 5.0.507.0. Retrieved from <https://www.geogebra.org>. Accessed on 24th June, 2023.
- Holman, R. T. 1954. *Progress in the Chemistry of Fats and Other Lipids*. Pergamon Press, Oxford.
- Justi, K. C., C Hayashi, J. V. Visentainer, N. E. de Souza y M. Matsushita. 2003. The influence of feed supply time on the fatty acid profile of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed on a diet enriched with n-3 fatty acids. *Food Chemistry* 80:489-493.
- Kanazawa, A., S. Teshima, M. Sakamoto, M. A. Awal. 1980. Requirements of *Tilapia zillii* for essential fatty acids. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*: 46: 1353-1356.
- Karapanagiotidis, I, M. V. Bell, D. C. Little y A. Yakupitiyage. 2007. Replacement of dietary fish oils by alpha-linolenic acid-rich oils lowers omega 3 content in tilapia flesh. *Lipids* 42:547-595.
- Kim, H-Y., X. Huang y A. Spector. 2014. Phosphatidylserine in the brain: Metabolism and function. *Progress in Lipid Research* 56:1-18.
- Kim, M. K. y R. T. Lovell. 1995. Effect of restricted feeding regimes on compensatory weight gain and body tissue changes in channel catfish *Ictalurus punctatus* in ponds. *Aquaculture* 135: 285-293.
- Lafont, J., L. C. Durango y H. Aramendiz. 2014. Estudio Químico del Aceite Obtenido a Partir de Siete Variedades de Soya (*Glycinemax* L.). *Información Tecnológica* 25:79-86.

- Laudadio, V y V. Tufarelli. 2010. Growth performance and carcass and meat quality of broiler chickens fed diets containing micronized-dehulled peas (*Pisum sativum* cv. Spirale) as a substitute of soybean meal. *Poultry Science* 89:1537-4300.
- Leyva-Rendón, A. 2011. DHA y funcionamiento cerebral: ¿Cuáles son los beneficios? *Revista Mexicana de Neurociencia*. 12:365-372.
- Li, J. J, K. F. Dou, Z. G. Zhou, D. Zhao, P. Ye, J. J. Zhao y L. X. Guo. 2022. Role of omega-3 fatty acids in the prevention and treatment of cardiovascular Diseases: A consensus statement from the Experts' Committee Of National Society Of Cardiometabolic Medicine. *Frontiers in Pharmacology* 13:1069992.
- Lim, C., Y. Medina y K. Phillip. 2011. Lipid and Fatty Acid Requirements of Tilapias. *North American Journal of Aquaculture* 73:188-193.
- Liu, Y., Y. Yan, Z. Han, Y. Zheng, X. Wang, M. Zhang, H. Li, J. Xu, X. Chen, Z. Ding y H. Cheng. 2022. Comparative effects of dietary soybean oil and fish oil on the growth performance, fatty acid composition and lipid metabolic signaling of grass carp, *Ctenopharyngodon Idella*. *Aquaculture* 22: 101002.
- Lourenço, E. C., A. Giménez-Ayala, C. Radice, M. L. Ojeda, R. Villamayor, P. Ramos, A. Manzini y M. Boroski. 2021. Fatty acid profile of lipid-rich food consumed in Paraguay. *Revista chilena de nutrición* 48:838-851.
- Lupette, J. y C. Benning. 2020. Human health benefits of very-long-chain polyunsaturated fatty acids from microalgae. *Biochimie* 178:15-25.
- Maldonado-Othón, C., M. Perez-Velazquez, D. M. Gatlin III, M. L. González-Félix. 2020. Replacement of fish oil by soybean oil and microalgal meals in diets for *Totoaba macdonaldi* (Gilbert, 1890) juveniles. *Aquaculture* 529:735705.
- Manning, B., H. M. Li, E. H. Robinson y C. Peterson. 2006. Enrichment of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fillets with conjugated linoleic acid and omega-3 fatty acids by dietary manipulation. *Aquaculture* 261:337-332.
- Monroig, O., K. Webb, L. Ibarra-Castro, G. J. Holt, D. R. Tocher. 2011. Biosynthesis of long-chain polyunsaturated fatty acids in marine fish: Characterization of an Elovl4-like elongase from cobia *Rachycentron canadum* and activation of the pathway during early life stages. *Aquaculture* 312:145-153.
- Montero, D., L. Robaina, M. J. Caballero, R. Gines y M. S. Izquierdo. 2005. Growth, feed utilization and flesh quality of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed diets containing vegetable oils: A time-course study on the effect of a re-feeding period with a 100% fish oil diet. *Aquaculture* 248:121-134.
- Mori, T. A, L. J. Beilin, V. Burke, J. Morris y J. Ritchie. 1997. Interactions between dietary fat, fish, and fish oils and their effects on platelet function in men at risk of cardiovascular disease. *Arteriosclerosis Thrombosis Vascular Biology* 17:279-86.
- Mufatto, L., R. Nobrega, D. Menoyo y D. Fracalossi. 2019. Dietary ratios of n-3/n-6 fatty acids do not affect growth of Nile tilapia at optimal temperatures (28°C) nor at temperatures that simulate the onset of winter (22°C). *Aquaculture Nutrition* 25:646-661.

- Murff, H. J., X. Shu, H. Li, Q. Dai, A. Kallianpur, G. Yang, H. Cai, W. Wen, Y. Gao y W. Zheng. 2009. A prospective study of dietary polyunsaturated fatty acids and colorectal cancer risk in Chinese women. *Cancer Epidemiology Biomarkers* 18:2283-2291.
- Neeraj, K., K. Nitish, S. K. Chandan, S. Gupta, P. Bhushan y P. Bapurao. 2022. Omega-3 fatty acids effectively modulate growth performance, immune response, and disease resistance in fish against multiple stresses. *Aquaculture* 547:737506.
- Nelson, D. y M. Cox. 2005. Lipids. en. Lehninger: Principles of Biochemistry. W. H. Freeman, Nueva York, EEUU. 363-386.
- Olivares, J., E. Juárez y F. García-García. 2015. El hipocampo: neurogénesis y aprendizaje. *Revista Médica de la Universidad Veracruzana* 1:20-28.
- Oliveira, F., F. Gomes, C. Sales, R. Rodrigues, C. Silva, C. Gebara, M. E. Lage. 2021. Better fatty acids profile in fillets of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) supplemented with fish oil. *Aquaculture* 534:736241.
- Pérez, R., L. Cartaya, V. Valencia, V. Sanjurjo Gámez y T. Ilisástigui. 1998. Biosíntesis de los productos del ácido araquidónico y su repercusión sobre la inflamación. *Revista Cubana de Estomatología* 35:56-61.
- Perez-Velazquez, M., D. M. Gatlin III, M. L. González-Félix, A. García-Ortega, C. R. de Cruz, M. L. Juárez-Gomez y K. Chen. 2019. Effect of fishmeal and fish oil replacement by algal meals on biological performance and fatty acid profile of hybrid striped bass (*Morone chrysops* ♀ × *M. saxatilis* ♂). *Aquaculture* 507, 83-90.
- Piñeiro-Corrales, G., N. Lago y J. M. Culebras-Fernández. 2013. Papel de los ácidos grasos omega-3 en la prevención de enfermedades cardiovasculares. *Nutrición Hospitalaria* 28:1-5.
- Pousão-Ferreira, P., L. O. Passos y A. Narciso. 1998. Contenido de HUFA y mejoramiento en la DHA/EPA de *Brachionus pficatilis* para larvas de pargo dorado (*Sparus aurata*). *Ciencias Marinas* 24:359-366.
- Proaño, F., J. R. Stuart, B. Chongo., L. Flores, M. Herrera., Y. Medina y L. Sarduy. 2015. Evaluación de tres métodos de saponificación en dos tipos de grasas como protección ante la degradación ruminal bovina. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 49:35-39.
- Py, C., R. Elizondo-González, y A. Peña-Rodríguez, 2022. Compensatory growth: Fitness cost in farmed fish and crustacean. *Reviews in Aquaculture* 14(3): 1389-1417.
- Razmaite, V., J. Gintautas, A. Šiukšcius y R. Šveistienė. 2011. Comparative characterization of fatty acid profiles in intramuscular lipids from different domestic and wild monogastric animal species. *Veterinarija ir zootechnika* 53:45-50.
- Rojbek, M. C., J. G. Stottrup, C. Jacobsen, J. Tomkiewicz, A. Nielsen y E. Trippel. 2014. Effects of dietary fatty acids on the production and quality of eggs and larvae of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture Nutrition* 20:654-666.
- Sanhueza, J., S. Nieto y A. Valenzuela. 2004. Ácido docosahexaenoico (DHA), desarrollo cerebral, memoria y aprendizaje: la importancia de la suplementación perinatal. *Revista Chilena de Nutrición* 31. doi: 10.4067/S0717-75182004000200002

- Sargent, J. R., D. R. Tocher y J. G. Bell. 2002. The lipids, en: Halver, J.E., Hardy, R.W. (Eds.), Fish Nutrition, third ed. Academic Press, San Diego, pp. 181-257.
- Sarker, P. K., A. R. Kapuscinski, A. J. Lanois, E. D. Livesey, K. P. Bernhard y M. L. Coley. 2016. Towards Sustainable Aquafeeds: Complete Substitution of Fish Oil with Marine Microalga *Schizochytrium* sp. Improves Growth and Fatty Acid Deposition in Juvenile Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). PLoS ONE 11:e0156684.
- Sathishkumar, S. y N. Felix. 2021. Growth performances and nutrient utilization efficiency of GIFT tilapia reared in floating net cages fed with bioprocessed silkworm pupae meal. Aquaculture Nutrition 27: 2786-2797.
- Schultz, S., A. M. Koussoroplis, Z. Changizi-Magrhoor, J. Watzke y Kainz, M. J. 2015. Fish oil-based finishing diets. Aquaculture Research 46:2174-2184.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Garantiza SAGARPA producción y sanidad de la tilapia en México. 2021. <https://www.gob.mx/conapesca/prensa/garantiza-sagarpa-produccion-y-sanidad-de-la-tilapia-en-mexico-171923#:~:text=Es%20importante%20recordar%20que%20M%C3%A9xico,y%20Michoac%C3%A1n%202023%20mil%20954>.
- Simopoulos, A. P. 2008. The importance of the omega-6/omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases. Experimental Biology and Medicine 233:674-688.
- Sprecher, H., 2000. Metabolism of highly unsaturated n-3 and n-6 fatty acids. Biochimica et Biophysica Molecular and Cell Biology of Lipids 1486:219-231.
- Stoneham, T. R. D. Kuhn, D. Taylor, A. Neilson, S. Smith, D. Gatlin, H. Si, S. Chu y S. O'Keefe. 2018. Production of omega-3 enriched tilapia through the dietary use of algae meal or fish oil: Improved nutrient value of fillet and offal. PlosOne 13:e0194241.
- Sugano, M. y F. Hirahara. 2000. Polyunsaturated fatty acids in the food chain in Japan. The American Journal of Clinical Nutrition 71:189-196.
- Suloma, A., O. El-Husseiny, A. El-Naem, A. Zidan y R. S. Mabroke. 2022. The efficiency of washout strategy on decreasing the deposit linoleic acid of tilapia fillet and viscera. Aquaculture Reports 23:101094.
- Symbolab (2022). Integral Calculator, EqsQuest Ltd. Retrieved from <https://www.symbolab.com>. Accessed on 24th June, 2023.
- Tocher, D. R. 2010. Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish. Aquaculture 41:717-732.
- Toyes-Vargas, E., C. C. Parrish, M. T. Viana, L. Carreón-Palau, P. Magallón-Servinc , F. J. Magallón-Barajasc. 2020. Replacement of fish oil with camelina (*Camelina sativa*) oil in diets for juvenile tilapia (var. GIFT *Oreochromis niloticus*) and its effect on growth, feed utilization and muscle lipid composition. Aquaculture 523:735177.
- Trushenski, J., J. Boesenberg y C. Kohler. 2012. Influence of Grow-Out Feed Fatty Acid Composition of Finishing Success in Nile Tilapia. North American Journal of Aquaculture 71:242-251.

- Turchini, G. M., B. E. Torstensen y W. K. Ng. 2009. Fish oil replacement in finfish nutrition. *Reviews in Aquaculture* 1:10-57.
- Turchini, G. M., D. S. Francis, S. P. Senadheera, S. D. Thanuthong, S. S. De Silva. 2011. Fish oil replacement with different vegetable oils in Murray cod: evidence of an “omega-3 sparing effect” by other dietary fatty acids. *Aquaculture* 31:250-259.
- Ulbricht, T. L. V. y D. A. T. Southgate. 191. Coronary heart disease: seven dietary factors. *Lancet* 338:985-992.
- Vajargah, M. 2021. A review of the physiology and biology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Journal of Aquaculture y Marine Biology* 10:244-246.
- Valenzuela, B. y A. Nieto. 2001. Ácido docosahexaenoico (DHA) en el desarrollo fetal y en la nutrición materno-infantil. *Revista Médica de Chile* 129:1203-1211.
- Valenzuela, R., G. Tapia., O. González y A. Valenzuela. 2011. Ácidos grasos omega-3 (EPA y DHA) y su aplicación en diversas situaciones clínicas. *Revista Chilena de Nutrición* 38:356-367.
- Vásquez, W., R. Olaechea y C. Sánchez. 2019. Efecto de la inclusión de diferentes fuentes lipídicas en la dieta de engorde sobre el perfil de ácidos grasos polinsaturados en filete de Paco *Piaractus brachypomus*. *Revista de la Sociedad Química del Perú* 85:315-326.
- Villanueva, X. y N. Mach. 2011. Role of Omega-3 fatty acids in the prevention of the colorectal cancer. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética* 15:47-55.
- Visentainer, J. V., N. E. de Souzaa, M. Makoto, C. Hayashi y M. R. Franco. 2005. Influence of diets enriched with flaxseed oil on the α -linolenic, eicosapentaenoic and docosahexaenoic fatty acid in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Food Chemistry* 90:557-560.
- Wagaw, S., M. Seyoum y A. Getahun. 2022. Diet composition and feeding habits of *Oreochromis niloticus* in Lake Shala, Ethiopia. *Fisheries and Aquatic Sciences* 25:20-30.
- Walsh, K. 2007. Immobilized enzyme technology for food applications. 60-84p. En R. Rastall. *Novel Enzyme Technology for Food Applications*. Woodhead Publishing Limited. Sawston, UK.
- Wijekoon, M., C. Parrish y A. Mansour. 2015. Effect of dietary substitution of fish oil with flaxseed or sunflower oil on muscle fatty acid composition in juvenile steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at varying temperatures. *Aquaculture* 447:108-115.