



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

**Análisis bioenergético de tilapia del Nilo alimentada con  
dietas a base de ingredientes alternativos**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctora en Ingeniería de Biosistemas

Presenta

M en C. Mónica Vanessa Oviedo Olvera

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Querétaro, Qro. a \_ de \_\_ de 202\_

**La presente obra está bajo la licencia:**  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



**CC BY-NC-ND 4.0 DEED**

**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional**

**Usted es libre de:**

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

**Bajo los siguientes términos:**

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

**Avisos:**

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Ingeniería de Biosistemas

Análisis bioenergético de tilapia del Nilo alimentada con dietas a base  
de ingredientes alternativos

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctora en Ingeniería de Biosistemas

Presenta

M en C. Mónica Vanessa Oviedo Olvera

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Dr. Juan Fernando García Trejo

Presidente

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez

Secretario

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Vocal

Dra. Rocío Campos Vega

Suplente

Dr. Miguel Betancourt Lozano

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Noviembre de 2025

México

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por confiar en mí y brindarme su apoyo incondicional durante este camino del posgrado. Siendo luz, fuerza y sobre todo amor cada día, principalmente en los momentos más difíciles.

A Montse, mi mejor amiga y cómplice de proyectos, sueños y aventuras (y una que otra travesura). Gracias por ser el mejor equipo, por tu amistad y por recordarme mi valor cuando lo necesitaba. Definitivamente el posgrado no hubiera sido lo mismo sin ti.

A mi mejor amiga Mirle, porque a pesar de la distancia me acompañaste muy de cerca en cada momento de este trayecto, escuchándome y creciendo juntas en todos los aspectos. Gracias por siempre creer en mí, incluso cuando yo no lo hacía.

A las personas que se cruzaron en el camino y se convirtieron en amigos que llevaré siempre conmigo. Gracias José Carlos, Fer Padilla, Alonso, Benito y Lupillo por su apoyo, enseñanzas, risas e inspiración.

Al Dr. Fernando y la Dra. Gely, por enseñarme el verdadero significado de ser un doctor y el trabajo en equipo. Gracias a mis compañeros del Laboratorio de Bioingeniería, en especial a Lety, Sam, Josa, Hugo, Jime e Isa; y a mis amigos del posgrado Raúl y Noelia.

A la Universidad Autónoma de Querétaro y la Secihti por su apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado.

## ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	12
II.	ANTECEDENTES	14
2.1.	Nutrición acuícola y bioenergética	14
2.2.	Alimentación convencional en la acuicultura	17
2.3.	Ingredientes alternativos en la alimentación de peces	18
2.3.1.	Hidrolizados proteicos de sub productos animales	19
2.3.2.	Larva de mosca soldado negra ( <i>Hermetia illucens</i> )	20
III.	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	23
3.1.	Hipótesis	23
3.2.	Objetivo general	23
3.2.1.	Objetivos particulares	23
IV.	METODOLOGÍA	24
4.1.	Descripción general del trabajo de investigación	24
4.2.	Elaboración y caracterización de alimentos alternativos	25
4.2.1.	Obtención de ingredientes alternativos	25
4.2.2.	Formulación de dietas experimentales	26
4.2.3.	Elaboración de dietas experimentales	27
4.2.4.	Ánalisis químicos alimentos	28
4.2.4.1.	Determinación de humedad	28
4.2.4.2.	Determinación de cenizas	28
4.2.4.3.	Determinación de proteína cruda	29
4.2.4.4.	Determinación de grasas totales	29
4.2.4.5.	Determinación de carbohidratos totales	30
4.2.4.6.	Determinación de energía bruta	30

4.3. Evaluación de alimentos alternativos en cultivo de tilapia	30
4.3.1. Localización	30
4.3.2. Descripción del biosistema	30
4.3.3. Descripción del organismo	31
4.3.4. Biometrías	32
4.3.5. Variables asociadas a la producción	32
4.3.6. Monitoreo de la calidad del agua	33
4.4. Evaluación de la eficiencia bioenergética de alimentos alternativos	34
4.4.1. Tasa de ingestión (C)	34
4.4.2. Metabolismo aerobio (R) y excreción nitrogenada (U)	34
4.4.3. Tasa de producción de heces (F)	35
4.4.4. Composición físico-química del pez	35
4.4.5. Crecimiento (P)	35
4.4.6. Análisis estadístico	35
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>37</b>
5.1. Alimentos experimentales suplementados con hidrolizados proteicos	37
5.1.1. Elaboración y caracterización de dietas	37
5.1.2. Evaluación del biosistema (cultivo de tilapia)	38
5.1.3. Evaluación de dietas suplementadas con hidrolizados proteicos	39
5.1.4. Monitoreo de la calidad de agua del cultivo	42
5.1.5. Evaluación bioenergética	43
5.1.6. Composición química de los alevines	47
5.2. Alimentos experimentales con larva de mosca soldado negra	49
5.2.1. Formulación y caracterización química de dietas	49
5.2.2. Elaboración de alimentos (extrusión)	51

5.2.3. Prueba de alimentación en cultivo de alevines de tilapia	52
5.2.4. Monitoreo calidad de agua	56
5.2.5. Evaluación bioenergética	57
5.2.6. Composición química de alevines	60
VI. CONCLUSIONES	62
VII. REFERENCIAS	63

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Comparación del contenido de aminoácidos esenciales de larva de mosca y harina de pescado. Recuperado de (Fantatto et al., 2024)	21
<b>Tabla 2.</b> Lista de ingredientes que conformaban la dieta comercial suplementada con hidrolizados proteicos	26
<b>Tabla 3.</b> Composición química de hidrolizados proteicos	27
<b>Tabla 4.</b> Comparación de la composición química de dietas experimentales suplementadas con hidrolizados proteicos	37
<b>Tabla 5.</b> Comparación de las variables asociadas a la producción de un cultivo de tilapia alimentado con suplemento de hidrolizados proteicos	39
<b>Tabla 6.</b> Variables monitoreadas para la calidad de agua del cultivo de tilapia alimentadas con suplemento de hidrolizados proteicos	43
<b>Tabla 7.</b> Variables asociadas al metabolismo aerobio de tilapia alimentada con dietas experimentales suplementadas con hidrolizados proteicos	44
<b>Tabla 8.</b> Elementos del balance energético determinados en un cultivo de tilapia alimentada con dietas experimentales	45
<b>Tabla 9.</b> Comparación de la caracterización química de tilapia alimentada con dietas experimentales	48
<b>Tabla 10.</b> Formulación de dietas experimentales con LMSN y comparación de su composición química	49
<b>Tabla 11.</b> Estimación del contenido de aminoácidos esenciales de dietas a base de LMSN	50
<b>Tabla 12.</b> Comparación de las variables asociadas a la producción de un cultivo de tilapia alimentado con dietas experimentales	53
<b>Tabla 13.</b> Monitoreo de la calidad de agua del cultivo de alevines alimentados con LMSN	56
<b>Tabla 14.</b> Variables asociadas al metabolismo aerobio de tilapia alimentada con LMSN	58
<b>Tabla 15.</b> Variables involucradas en el balance bioenergético de tilapia alimentada con dietas experimentales	59
<b>Tabla 16.</b> Composición química alevines alimentados con dieta a base de larva de mosca soldado negra y harina de pescado	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo que involucra la partición y disipación de la energía para su estudio en animales, recuperado de (Jobling, 2017).	14
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo por etapas del trabajo de investigación	25
<b>Figura 3.</b> Esquema del acomodo del sistema de recirculación del cultivo de tilapia. La recirculación de agua se indica con flechas. A) Peceras de 12 L, B) Reservorio para recirculación de agua	31
<b>Figura 4.</b> Esquema de la toma de longitud total (A) y longitud patrón (B) para peces.	32
<b>Figura 5.</b> Elementos a determinar para el análisis del balance bioenergético en tilapia del Nilo alimentada con dietas alternativas.	34
<b>Figura 6.</b> Comparación del peso obtenido en alevines de tilapia cultivadas en dos densidades diferentes (n = 10 y 20, respectivamente). Fisher LSD 95% I.C.	39
<b>Figura 7.</b> Comparación de la proporción energética en porcentaje de las variables asociadas a la bioenergética de alevines de tilapia con base en la energía consumida (C). Variables energéticas asociadas a heces (F), metabolismo (R ), excreción nitrógeno (U) y crecimiento (P). N = 3.	47
<b>Figura 8.</b> Comparación de la ganancia en peso de la ganancia en peso promedio de tilapias alimentadas con dietas experimentales con LMSN durante el tiempo experimental. Intervalo de confianza en barras (Tukey 95%).	53
<b>Figura 9.</b> Comparación de la proporción energética en porcentaje de las variables asociadas a la bioenergética de alevines de tilapia con base en la energía consumida (C). Variables energéticas asociadas a heces (F), metabolismo (R ), excreción nitrógeno (U) y crecimiento (P). N=4.	60

## INDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Descripción gráfica de la distribución de variables bioenergéticas en un pez	16
<b>Ilustración 2.</b> Biosistema de cultivo utilizados para la evaluación de dietas experimentales	38
<b>Ilustración 3.</b> Fases de procesamiento de mezclas de harina para elaboración de dietas experimentales por extrusión, a) Dado utilizado para obtención de alimento con 2 mm de diámetro, b) extrusión de mezclas, c) secado de alimentos por deshidratados eléctrico, d) alimento obtenido	52

## **RESUMEN EN ESPAÑOL**

El estudio de la alimentación y respuestas bioquímicas y fisiológicas involucradas en el aprovechamiento de sus nutrientes para el desarrollo de organismos acuáticos está asociado a la nutrición acuícola. La bioenergética es el estudio de la partición de energía obtenida por medio de la dieta consumida y la determinación de las variables asociadas a la energética nutricional (consumo de alimento, crecimiento y metabolismo) permite la estimación de la eficiencia de un alimento para el cultivo de peces. En este estudio se llevó a cabo el análisis de la bioenergética de alevines de tilapia del Nilo para evaluar insumos alternativos como los hidrolizados proteicos y larva de mosca soldado negra. Como parte de la fase experimental se formularon dietas para alevines con suplementación de hidrolizados proteicos derivados de residuos de pollo, cerdo y pez, y reemplazo de harina de pescado con harina de larva. Las dietas se sometieron a pruebas de alimentación en un cultivo con condiciones ambientales monitoreadas; se tomaron biometrías a los peces y se determinaron las variables bioenergéticas por medio de la técnica de respirometría con cámaras semicerradas y recolección de heces y alimento por sifón. Para la evaluación de hidrolizados proteicos, los tres tipos de hidrolizados generaron una mayor ganancia en peso (hasta 13.5 g) en contraste con la dieta control sin suplementación, asimismo, las dietas con hidrolizados de cerdo y pez obtuvieron una eficiencia energética acorde al crecimiento obtenido. Por otro lado, las dietas con inclusión del 50 y 75% de larva de mosca obtuvieron un menor rendimiento de crecimiento en comparación con la dieta control e incluso menor comparadas con las dietas de hidrolizados. Respecto al balance bioenergético, la dieta con 50% de larva obtuvo una mayor eficiencia energética en comparación con la dieta a base de harina de pescado. Si bien, ambos insumos alternativos se consideran una opción viable para su inclusión en dietas para alevines de tilapia, los hidrolizados proteicos resultan ser un insumo con mayor aprovechamiento por parte de los peces y proporcionando efectos benéficos tanto al crecimiento como al uso de energía proporcionados por el consumo del alimento. Además, a partir de este estudio se sugiere el procesamiento de la harina de larva de mosca soldado para aumentar su asimilación para organismos acuáticos como la tilapia, particularmente en etapas tempranas de desarrollo.

**Palabras clave:** nutrición animal, bioenergética nutricional, proteínas alternativas, tilapia del Nilo, acuicultura

## ABSTRACT

The study of nutrition and the biochemical and physiological responses involved in the utilization of nutrients for the development of aquatic organisms is associated with aquaculture nutrition. Bioenergetics is the study of the partitioning of energy obtained through diet, and the determination of variables associated with nutritional energy (food consumption, growth, and metabolism) allows for the estimation of the efficiency of a food for fish farming. In this study, the bioenergetics of Nile tilapia fry were analyzed to evaluate alternative inputs such as protein hydrolysates and black soldier fly larvae. As part of the experimental phase, diets were formulated for fry with supplementation of protein hydrolysates derived from chicken, pork, and fish waste, and replacement of fish meal with larval meal. The diets were tested in a culture with monitored environmental conditions; biometrics were taken from the fish and bioenergetic variables were determined using the respirometry technique with semi-closed chambers and collection of feces and food by siphon. For the evaluation of protein hydrolysates, the three types of hydrolysates generated greater weight gain (up to 13.5 g) in contrast to the control diet without supplementation. Likewise, diets with pork and fish hydrolysates obtained energy efficiency in line with the growth achieved. On the other hand, diets containing 50% and 75% fly larvae obtained lower growth performance compared to the control diet and even lower compared to the hydrolysate diets. Regarding the bioenergy balance, the diet with 50% larvae obtained higher energy efficiency compared to the fishmeal-based diet. Although both alternative inputs are considered a viable option for inclusion in diets for tilapia fry, protein hydrolysates are an input that is better utilized by fish and provides beneficial effects on both growth and energy use from food consumption. Furthermore, this study suggests that soldier fly larvae meal should be processed to increase its assimilation by aquatic organisms such as tilapia, particularly in the early stages of development.

Keywords: animal nutrition, nutritional bioenergetics, alternative proteins, Nile tilapia, aquaculture

## I. INTRODUCCIÓN

De las diferentes estrategias que aportan al cumplimiento de la seguridad alimentaria, la intensificación de sistemas agropecuarios ha logrado aportar una gran cantidad de alimentos nutritivos para la población mundial. Uno de los sectores más reconocidos en los últimos años por proveer alimentos ricos en proteína y de forma accesible es la acuicultura. Hasta el año 2023, la acuicultura logró superar la producción pesquera y de extracción, proporcionando más del 50% de los peces para consumo humano a nivel mundial (FAO, 2024). Este crecimiento en los sistemas acuícolas ha ejercido presión sobre uno de los factores más importantes que garantizan su producción, la alimentación de los organismos (Fantatto et al., 2024). Entre las principales problemáticas de la industria alimentaria esta la fluctuación en la disponibilidad y costos de los ingredientes marinos, como la harina de pescado, que son una fuente esencial de proteína en las formulaciones para peces (Hua et al., 2019). Por lo que, el incremento en la demanda de alimentos ha desencadenado una búsqueda continua de nuevos ingredientes que resulten en alternativas rentables, sustentables y de alta calidad nutricional para la alimentación de peces de interés comercial (Zlaugotne et al., 2022).

El estudio de la alimentación y las respuestas bioquímicas y fisiológicas involucradas en el aprovechamiento de sus nutrientes para el desarrollo de organismos acuáticos está asociado a la nutrición acuícola. El enfoque de ésta consiste en el análisis y evaluación de ingredientes mediante diversos métodos, técnicas e investigaciones de carácter científico para el mejoramiento de formulaciones alimenticias (Turchini & Hardy, 2024). Es gracias a la nutrición acuícola que hoy en día se han evaluado un gran número de ingredientes nuevos potenciales para alimentación de peces. Entre los insumos más destacados se encuentran los cultivos agrícolas y sus residuos, sub productos de origen animal con sus diferentes tratamientos, microorganismos e insectos (Macusi et al., 2023; Serra et al., 2024). Si bien todos estos ya han sido probados en diferentes niveles de inclusión y como reemplazo de fuentes de proteína en alimentos balanceados para peces, entre los que han logrado cumplir con la mayoría de las características necesarias para ser considerados como alternativas viables (calidad nutricional, costos de producción, volumen y sustentabilidad) están la larva

de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) y el tratamiento de sub productos de origen animal, como los hidrolizados proteicos (Serra et al., 2024).

Ambos ingredientes alternativos han reportado diferentes beneficios al incluirse en la alimentación de especies carnívoras y omnívoras, dando como resultados un aumento en el crecimiento de los peces (Hender et al., 2021; Siddik et al., 2021); aporte de nutrientes con mayor biodisponibilidad para los organismos que se ven reflejados en una mayor asimilación de los alimentos (Wu et al., 2022); un perfil de aminoácidos similar al de la harina de pescado que permite una mayor sustitución de ingredientes marinos (Abdel-Tawwab et al., 2020) e incluso ambos ingredientes se han relacionado con propiedades funcionales al impactar de forma positiva en el sistema inmunológico de los organismos, haciéndolos más resistentes a cambios ambientales y enfermedades (Miron et al., 2023; Suratip et al., 2023). Sin embargo, el estudio del flujo y distribución de energía en organismos acuáticos, conocida también como bioenergética, al ser alimentados con dietas que incluyan ingredientes alternativos ha sido poco explorado en la actualidad.

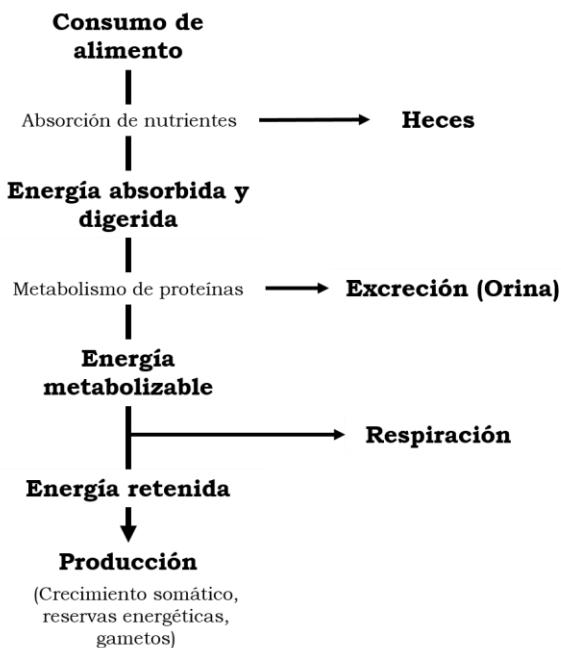
Hasta el día de hoy, la inclusión de ingredientes alternativos se ha convertido en una línea de investigación importante en la nutrición animal que ha proporcionado información de gran relevancia para la industria alimentaria respecto a porcentajes de inclusión en las formulaciones, crecimiento, inmunología, calidad nutricional y digestibilidad de insumos. No obstante, cuestiones que involucran el efecto de estos ingredientes sobre el consumo de alimento, respiración y distribución energética que indican las ganancias y pérdidas de energía aún carecen de estudio suficiente y bien podrían aportar a complementar reportes previos.

Es por esto que, el presente trabajo tiene como objetivo determinar el balance bioenergético de tilapia del Nilo al ser alimentada con ingredientes alternativos como la harina de larva de mosca soldado y los hidrolizados proteicos derivados de sub productos de origen animal con el fin de analizar su aprovechamiento y eficiencia energética en el pez. Esto generará la información necesaria para valorar su efecto sobre la nutrición de peces, es decir, cómo es que los ingredientes alternativos, en conjunto con su aporte energético y nutrientes, son fraccionados y asimilados por el organismo.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. Nutrición acuícola y bioenergética

Como parte del estudio en la nutrición animal, es bien sabido que los alimentos son la fuente principal de energía química que por medio de diversas reacciones catabólicas permiten mantener los procesos fisiológicos para mantener vivos a los organismos (Lupatsch, 2014; Watanabe, 1996). La bioenergética, conocida también como energética nutricional, comprende al estudio del balance entre el aporte de energía obtenido por la alimentación, el gasto de ésta y la ganancia (en forma de biomasa) obtenida en un organismo (Cho, 1996). Esta se ha establecido como un área importante para las ciencias animales aplicadas, ya que ha contribuido al desarrollo de modelos utilizados para predecir el desarrollo animal y sus requerimientos nutricionales, asimismo, que estos estudios puedan ser implementados para la formulación y evaluación de alimentos (Jobling, 2017). Para obtener un análisis bioenergético es necesaria la determinación de diferentes procesos fisiológicos y metabólicos por los cuales la energía es transformada para el mantenimiento, crecimiento y reproducción (Jobling, 2017; Lupatsch, 2014).



**Figura 1.** Diagrama de flujo que involucra la partición y disipación de la energía para su estudio en animales, recuperado de (Jobling, 2017).

La Figura 1 desglosa de forma general el flujo de energía dentro de los sistemas biológicos a partir de su alimentación. La transformación de la energía química aportada por los alimentos no puede ser del todo aprovechada, destacando su pérdida por medio de procesos como la respiración y la excreción de heces y orina, así como por el grado de digestibilidad de los nutrientes (Lupatsch, 2014). De acuerdo con lo reportado por The National Research Council (National Research Council, 2011) y (Jobling, 2017), las primeras variables involucradas en el modelo bioenergético para peces constan de la energía bruta (C), aportada inicialmente por el alimento, y los desechos de la digestión de éste que son las heces (F) y la excreción de orina (U). A partir de éstos es posible obtener la energía absorbida (DE) y la energía metabolizable (ME), ésta última es la energía que se podrá transformar para proporcionar los requerimientos necesarios para la supervivencia, crecimiento y reproducción del organismo. Finalmente, el gasto energético relacionado con la pérdida de calor por parte de las reacciones bioquímicas realizadas durante la digestión es medido a partir de la respiración del pez (R). Al estimar la variable R y restarla a ME es como se obtiene la energía retenida destinada al crecimiento del pez, también llamada energía de producción (P).

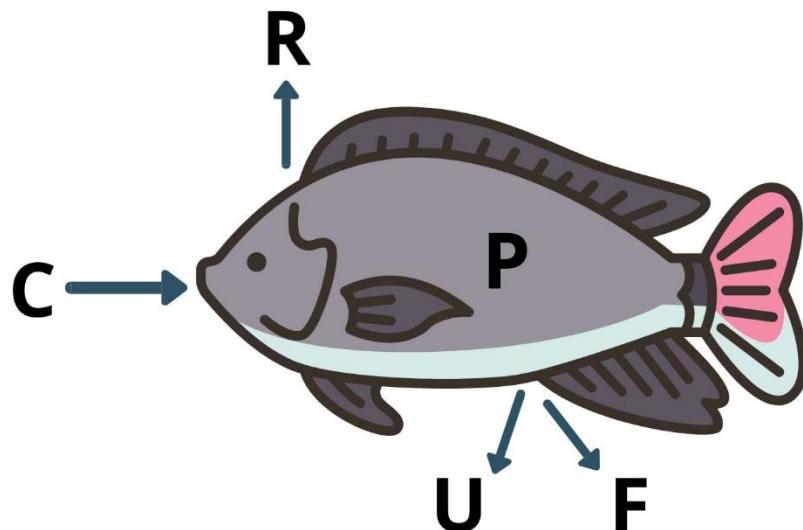
Todas estas variables pueden resumirse en la siguiente ecuación, el balance energético típico para describirlo de manera fisiológica (Davies & Hatcher, 1998):

$$C = P + R + F + U \quad (1)$$

Es a partir de la determinación de éstas variables que la bioenergética ha podido estudiar la transformación de la energía de acuerdo a la digestión de los diferentes nutrientes en los alimentos, la absorción de éstos por el metabolismo y su distribución entre tejidos y funciones propias de la fisiología del organismo.

Generalmente, los modelos bioenergéticos se han utilizado para evaluar diferentes factores que afectan el crecimiento de peces como lo son el tipo de alimentación o condiciones ambientales (Deslauriers et al., 2017). Cabe mencionar que, en los organismos acuáticos, los factores ambientales son de vital importancia para su desarrollo ya que van a impactar directamente en el aprovechamiento de energía. Factores abióticos como la temperatura, luz, concentración de oxígeno, calidad de agua de cultivo, así como factores bióticos (competencia, parásitos, predadores, etc.), van a influir directamente en el gasto y retención de energía de los peces (Jobling, 2017).

Si bien, la bioenergética acuícola es un área de estudio que es aplicada a los peces desde 1914 por Ege y Krogh y con una diversidad de trabajos que detallan la utilización y pérdida de energía en diferentes especies, continúa siendo una herramienta analítica que ha evolucionado y comúnmente utilizada para entender diferentes preguntas fisiológicas y ecológicas involucradas con la nutrición animal (Deslauriers et al., 2017).



**Ilustración 1.** Descripción gráfica de la distribución de variables bioenergéticas en un pez

El balance energético también se ha utilizado como estrategia para mejorar el rendimiento de cultivo de peces. (Yi, 1988) desarrolló un modelo de crecimiento a partir de la comparación de dos cultivos de tilapia del Nilo, estanques abiertos y cultivo en jaulas. El modelo consideraba variables abióticas de calidad de agua (oxígeno disuelto y concentración de amonio), así como el tipo de alimentación (artificial o natural) y proporcionaba información relevante para optimizar el desarrollo de tilapia dependiendo del tipo de cultivo.

Estess et al. (2017), realizaron el análisis bioenergético del atún aleta amarilla durante 20 años en el que determinaron el efecto que tenían variables como la temperatura, alimentación y cautiverio de los organismos. Por medio variables asociadas a la bioenergética concluyeron que mantener a esta especie bajo cultivo resulta costoso ya que su eficiencia energética de alimentación disminuye, aprovechando solo el 7.8% de su energía en crecimiento; siendo

este un cultivo acuícola costoso bajo las condiciones que los autores evaluaron. Por otra parte, el balance bioenergético también ha sido utilizado para analizar el efecto de macronutrientes como proteínas, carbohidratos y grasas sobre la eficiencia energética; se ha reportado como el incremento de carbohidratos en la alimentación del bagre africano disminuye su eficiencia de utilización de energía de 93.5% a 78.5% (Phan et al., 2022). Además, los autores destacaron la importancia de abastecer la energía digestible de un organismo para asegurar la energía retenida (destinada al crecimiento) en el mismo. Similar a este estudio, (Schrama et al., 2018) evaluaron diversas dietas sobre la eficiencia energética y digestibilidad de macronutrientes en el crecimiento de tilapia del Nilo, reportaron 49, 91 y 66% de eficiencia para la proteína, grasas y carbohidratos respectivamente, siendo linealmente asociada la energía digestible de cada macronutriente con la energía retenida en el pez. Así mismo, la ración de alimentación (Xie et al., 1997), alimento vivo o formulado (Xue et al., 2021) y modificando la proporción de macronutrientes (Duong et al., 2021), ha sido también estudiado con metodologías derivadas de la bioenergética.

Cabe mencionar que las diversas evaluaciones de la energética nutricional que involucran la suministración de diferentes tipos de dietas utilizan formulaciones con ingredientes convencionales como lo es las harinas de origen vegetal o de origen marino, como la harina de pescado. El uso de insumos alternativos aún no ha sido estudiado bajo el enfoque energético.

De acuerdo con (Lall & Dumas, 2015), la evaluación de dietas alternativas y de nuevos insumos aplicados a la alimentación de organismos acuícolas debe ser a partir de métodos nutricionales, como la bioenergética, y tecnologías de los alimentos, para lograr la formulación de dietas nutricionalmente adecuadas.

## **2.2. Alimentación convencional en la acuicultura**

Los alimentos acuícolas tradicionales son formulados con una variedad de insumos, entre los más comunes se encuentran cereales como el trigo y el maíz, legumbres (frijol, chicharos), oleaginosas como la soya y la semilla de girasol y productos y subproductos de origen animal como la harina de pescado, harina de carne y hueso y la harina de sangre (Rahman et al., 2023). Todas estas materias primas proporcionan los requerimientos nutricionales para un organismo, particularmente proteína y energía, necesarios para llevar a cabo sus funciones

fisiológicas normales (Encarna  o, 2016). Actualmente existen una gran variedad de alimentos para especies acuáticas en el mercado que modifican su precio según la calidad de sus ingredientes, sin embargo, no todos ofrecen un balance idóneo de los nutrientes afectando el desarrollo del pez (Xie et al., 2017).

La industria productora de harina de pescado (principal fuente de proteína en la alimentación para peces), ha presentado un notable estancamiento debido al rápido crecimiento de la acuicultura y su alta demanda implicada en la producción de alimentos (Gasco et al., 2018). De acuerdo con la Organización de Ingredientes Marinos (IFFO), la producción de harina de pescado se ha mantenido en aproximadamente 5 millones de toneladas al año que se reparten en la producción de alimentos para la acuicultura (87%), porcicultura (7%), alimento para mascotas (4%) y para la avicultura (1%) (FAO, 2024). Este incremento en la demanda de harina de pescado ha tenido como consecuencia la fluctuación en sus precios e impactando tanto en los costos de producción de la acuicultura como en la utilización de este ingrediente en la formulación de alimentos. Es a partir de esto que se ha desencadenado la búsqueda de nuevos ingredientes que tengan la calidad nutricional y producción sustentable necesarias para sustituir a la harina de pescado o que permitan complementar las formulaciones de los alimentos acuícolas (Zlaugotne et al., 2022).

### **2.3. Ingredientes alternativos en la alimentación de peces**

En este sentido, se consideran como alimentos alternativos a aquellos que en sus formulaciones sustituyen parcial o totalmente la inclusión de ingredientes marinos (FAO, 2019). Hasta hoy, la sustitución de harina de pescado en la alimentación de peces ha sido posible utilizando diferentes nuevos insumos y obteniendo resultados favorables para los cultivos acuícolas (Jones et al., 2020). Serra et al. (2024) reportaron algunos de estos insumos alternos, entre los que destacan: cultivos agrícolas y sus residuos (origen vegetal), subproductos de origen animal, microorganismos e insectos. Todas estas fuentes de proteína alternativas han sido probadas en diferentes niveles de inclusión en las dietas de distintas especies acuáticas, reemplazando tanto parcial como totalmente a la harina de pescado (Macusi et al., 2023; Rahman et al., 2023; Serra et al., 2024). Por tanto, de manera general, se pueden clasificar a los insumos alternativos a la harina de pescado de acuerdo a su origen: vegetal, animal, microorganismos y entomológico. Asimismo, cada uno de los tipos de

harinas alternativas ya han sido aplicadas y probadas para el desarrollo de alimentos para organismos acuáticos y con diversas ventajas y desventajas.

### **2.3.1. Hidrolizados proteicos de sub productos animales**

El procesamiento industrial de productos de origen animal ha generado una gran cantidad de residuos como vísceras, carne, grasas, piel, huesos, plumas, sangre, entre otros, que representan aproximadamente entre 33 y 43% en la producción ganadera y avícola y hasta 57% en el procesamiento de pescado (Martínez-Alvarez et al., 2015). A partir de la búsqueda de re valorizar este tipo de residuos, se ha reportado que todos éstos son una fuente de proteína, grasas, carbohidratos y minerales que pueden ser utilizados para la industria alimentaria animal (Zou et al., 2021). Para poder ser incluidos como ingredientes para la formulación de alimentos, es necesario someter los residuos a diversos procesamientos, el más utilizado ha sido la hidrólisis proteica. Este método consiste en la partición de las estructuras proteicas en péptidos de cadena corta y aminoácidos libres con el objetivo de incrementar su biodisponibilidad para consumo animal (Zou et al., 2021). Existen diversas formas de realizar una hidrólisis de proteínas: por reacciones ácido-base, utilizando enzimas o combinando ambas metodologías; pero es la hidrólisis enzimática la que permite mantener una mayor integridad en péptidos y aminoácidos, dando como resultados hidrolizados con propiedades funcionales (Habinshuti et al., 2023).

Para la acuicultura, los hidrolizados proteicos han sido utilizados como reemplazo parcial a la harina de pescado en las dietas de diferentes especies, reportando efectos benéficos en crecimiento, aprovechamiento de nutrientes y sistema inmunológico (Egerton et al., 2020; Khosravi et al., 2015; Zheng et al., 2012). Los hidrolizados proteicos derivados de residuos de pescado se han sugerido como estimuladores al consumo de alimento por su palatabilidad en especies como el salmón, además de aportar al incremento del crecimiento del pez (Sandbakken et al., 2023). Por otro lado, este tipo de hidrolizados también se han utilizado como sustitutos parciales de la harina de pescado y han aportado efectos benéficos en el crecimiento y respuesta inmunológica con tan solo adicionarlo al 2.5% (Suratip et al., 2023). El uso de hidrolizados como aditivos también ha sido estudiado en la alimentación de tilapia del Nilo; los hidrolizados derivados de vísceras de pollo incrementan la actividad antioxidante y reducen el daño a proteínas en esta especie (Gomes et al., 2023). Por otro lado,

se ha comparado la adición de hidrolizados proteicos en dietas con otro ingrediente alternativo muy popular en los últimos años, los insectos. (Villanueva-Gutiérrez et al., 2022) evaluaron el uso de hidrolizados de soya en la alimentación de Totoaba, concluyendo que es posible reemplazar el 15% de harina de pescado por hidrolizado de soya sin alterar el desarrollo del pez, así como tampoco su composición corporal. Además, obteniendo resultados superiores a los generados con dietas a base de larva de mosca soldado negro. Esto último confirma que el tratamiento de ingredientes por métodos como la hidrólisis enzimática aumenta la biodisponibilidad de nutrientes para los organismos.

El uso de hidrolizados proteicos en la nutrición animal promete convertirse en una opción viable para el desarrollo de alimentos debido a las propiedades nutricionales que logran adquirir los insumos al ser sometidos a este tratamiento (Hou et al., 2017a). A pesar de ello, es necesario continuar su evaluación bajo el enfoque nutricional, particularmente determinando su efecto sobre asimilación, metabolismo y flujo energético en organismos acuáticos.

### **2.3.2. Larva de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)**

Los insectos han destacado en la última década por ser ingredientes innovadores y sustentables para la nutrición animal. Su integración a la alimentación como una fuente de proteína ha sido ya evaluada en diversas especies obteniendo una favorable aceptación, así como varios beneficios enfocados en el crecimiento y salud de los organismos que los consumen. Para la acuicultura, la integración de insectos en la alimentación de peces ha resultado ser una estrategia relevante para mantener su productividad y sustentabilidad (Fantatto et al., 2024). De acuerdo con (El-Sayed et al., 2020), el uso de insectos como la mosca soldado negra ha sido reconocido como una alternativa económica y eficiente para el reemplazo de harina de pescado e incluso de harina de soya. La mosca soldado negra en su etapa larval es la más utilizada en la alimentación de peces. Esta es considerada una fuente alimenticia de alto valor nutricional debido a su contenido de proteína y ácidos grasos (Makkar et al., 2014). La larva de mosca soldado negra se ha establecido como un ingrediente competitivo al tener alta eficiencia nutricional y bajo impacto ambiental. La obtención de la larva de *H. illucens* es mediante su alimentación con materia orgánica en descomposición, es por esto que su composición nutricional puede variar dependiendo del tipo de sustrato en el

que se cultiva. Su contenido de proteína se ha reportado desde un 30 hasta 60% y desde un 6 hasta 40% en su concentración de grasas (Barragan-Fonseca et al., 2017).

**Tabla 1.** Comparación del contenido de aminoácidos esenciales de larva de mosca y harina de pescado. Recuperado de (Fantatto et al., 2024)

Aminoácidos esenciales (g/16 g N)	Larva de mosca soldado negra	Harina de pescado
Histidina	3	2.4
Isoleucina	5.1	4.2
Leucina	7.9	7.2
Lisina	6.6	7.5
Metionina	2.1	2.7
Fenilalanina	5.2	3.9
Treonina	3.7	4.1
Triptófano	0.5	1.0
Valina	8.2	4.9

A partir de esto, actualmente existen una gran cantidad de trabajos relacionados con el uso de harina de larva de mosca soldado negra como ingrediente en la formulación de alimentos para peces. (Belghit et al., 2018) sustituyeron el 85% de proteína, así como la totalidad de aceites vegetales por larva de mosca soldado en las dietas de *Salmo salar*; teniendo como resultados una disminución del 4.93% en la tasa de conversión alimentaria y un alza del 3.44% del factor de condición, ambos comparados con peces alimentados con harina de pescado y aceite vegetal. (Fawole et al., 2020), concluye que es viable el reemplazo de hasta el 75% de la harina de pescado en dietas formuladas para el bagre africano sin afectar su crecimiento y aprovechamiento de nutrientes, recomendando la sustitución del 50% del contenido de proteína de pescado. Por otro lado, (Abdel-Tawwab et al., 2020) evaluó el efecto de la larva de mosca soldado negro en el crecimiento, índices somáticos, composición corporal y variables hemato-bioquímicas del pez lobina (*Dicentrarchus labrax*) y obteniendo resultados sin cambios significativos en las variables previamente mencionadas. De este trabajo cabe destacar que la larva cumplió con los requerimientos de aminoácidos esenciales de la especie, las dietas no afectaron tanto el estado de salud como el estado nutricional de

los peces medido a través de parámetros hematológicos y de acuerdo al estudio de eficiencia económica realizado sobre la inclusión de larva en la alimentación, se logró reducir el costo hasta un 15.6% reemplazando 50% de harina de pescado.

Dentro de las características vitales para el desarrollo de alimentos acuícolas se encuentra el comportamiento con el agua. Aspectos como la flotabilidad, absorción y solubilidad en el agua, densidad, entre otros, se van a ver afectados de acuerdo al tipo de ingredientes que se utilizan en los formulados (Sørensen, 2012). La inclusión de larva de mosca ha sido también estudiada en este enfoque de tecnología de alimentos y diversos autores han concluido que la incorporación de este insecto en alimentos acuícolas si permite obtener productos que cumplan con las características físicas adecuadas para cultivos acuícolas (Laurent et al., 2024).

### **III. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

#### **3.1. Hipótesis**

El análisis de los elementos que constituyen el balance bioenergético, permitirá detectar un efecto diferencial sobre el aprovechamiento de energía y nutrientes entre la ingesta de alimentos balanceados con ingredientes alternativos, y una dieta a base de harina de pescado en tilapia del Nilo. Lo anterior se reflejará específicamente en el crecimiento, productos del metabolismo aerobio y composición química del pez.

#### **3.2. Objetivo general**

Determinar, a través del balance bioenergético, la diferencia entre el aprovechamiento de energía y asimilación de nutrientes provenientes de dietas balanceadas con ingredientes alternativos y alimentos convencionales en tilapia del Nilo.

##### **3.2.1. Objetivos particulares**

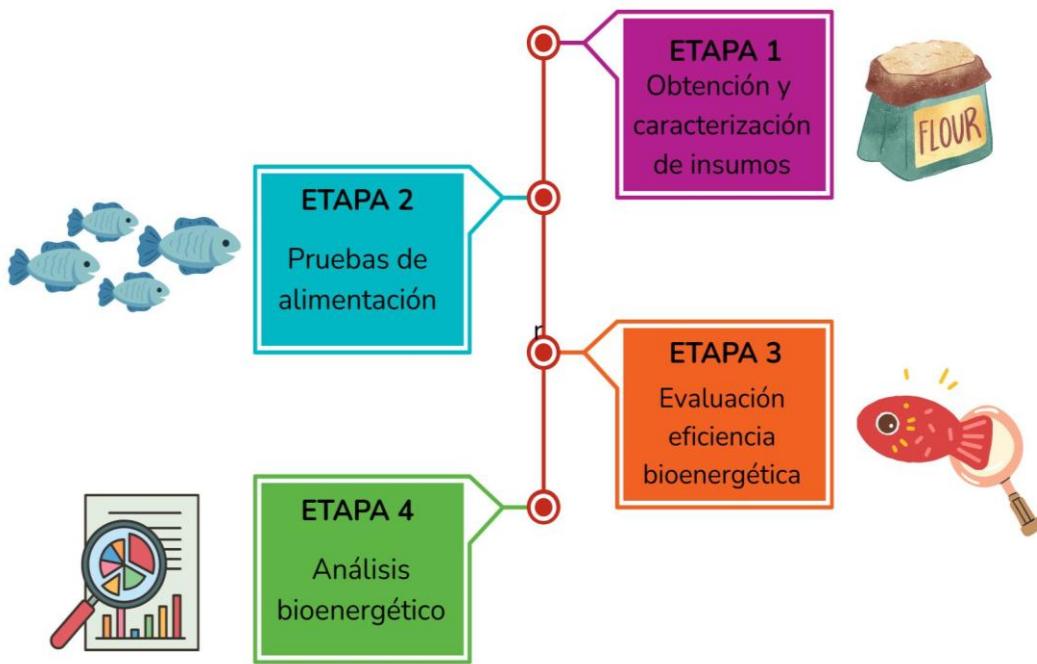
- Elaborar y caracterizar físico-químicamente alimentos alternativos para tilapia a partir de sus requerimientos nutrimentales para su etapa de alevín.
- Evaluar el efecto de los alimentos alternativos y dieta convencional, en cultivo de tilapia bajo condiciones ambientales monitoreadas.
- Determinar los elementos involucrados en el balance bioenergético de la tilapia, resultado del consumo de las diferentes dietas.

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1. Descripción general del trabajo de investigación

Para la realización de este trabajo se consideraron cuatro etapas principales (Figura 2): la primera etapa constó de la obtención y caracterización de los insumos utilizados en la formulación de los alimentos alternativos, así como su posterior elaboración. La segunda etapa correspondió a las pruebas de alimentación llevadas a cabo en un cultivo de tilapia, con el fin de tener un estudio comparativo de las dietas experimentales; en esta etapa se calcularon las variables asociadas a la producción del cultivo para su evaluación y comparación con el crecimiento propiciado por una alimentación convencional (con harina de pescado). En la etapa tres del proyecto se realizó la evaluación de la eficiencia bioenergética de los alimentos alternativos sobre el desarrollo de tilapia; dentro de esta etapa se desarrollaron las pruebas in vivo de consumo, digestibilidad, metabolismo, etc. Finalmente, durante la etapa cuatro se realizaron los análisis bioenergéticos con los datos obtenidos para su comparación.

Cabe mencionar que para este trabajo se siguió la misma metodología para la evaluación de los dos ingredientes alternativos adquiridos: harina de larva de mosca soldado negra e hidrolizados proteicos derivados de sub productos de origen animal.



**Figura 2.** Diagrama de flujo por etapas del trabajo de investigación

## 4.2. Elaboración y caracterización de alimentos alternativos

### 4.2.1. Obtención de ingredientes alternativos

Para la preparación de los alimentos experimentales se utilizaron dos ingredientes alternativos para evaluar su efecto en el desarrollo de alevines de tilapia: hidrolizados proteicos incluidos como suplementos en un alimento comercial conocido y harina de larva de mosca soldado negra como reemplazo proteico de la harina de pescado en formulaciones balanceadas con otras harinas de origen animal y vegetal.

Por un lado, tres diferentes hidrolizados proteicos fueron proporcionados por grupo NU-3, los cuales fueron obtenidos del procesamiento de residuos pecuarios derivados de la producción de aves, cerdos y pescado. Así mismo, el mismo grupo proporcionó el alimento comercial al cuál se le suplementaría 1.5 y 3% de los hidrolizados para realizar las diferentes pruebas.

**Tabla 2.** Lista de ingredientes que conformaban la dieta comercial suplementada con hidrolizados proteicos

Ingredientes	(g/100g)
Harina de carne	50.02
Harina de sangre	0.50
Harina de pescado	15.0
Pasta de soya	5.0
Harina de trigo	21.50
Aceite de pescado	2.0
L-lisina	1.20
Mix vitaminas y minerales	0.30
Aditivos	1.49

La larva de mosca soldado se solicitó a la planta piloto de producción de mosca soldado (*H. illucens*), ubicada en el Campus Amazcala, Facultad de Ingeniería; aquí la reproducción, crecimiento y desarrollo de la especie se llevan a cabo bajo condiciones ambientales controladas y además se les proporciona una dieta controlada a base de cereales. La larva, posterior a su cosecha, es secada a 60°C por 48 horas en horno y desgrasada en un extractor de grasa mecánico (Expeller). El residuo desgrasado es pulverizado para su uso como harina para alimentación.

Las dietas a base de larva de mosca soldado fueron balanceadas con ingredientes de origen vegetal (maíz, pasta de soya y salvado de trigo) y origen animal (harina de pescado) con el fin de obtener alimentos experimentales isoproteicos aptos para cumplir los requerimientos nutricionales de los alevines de tilapia del Nilo.

#### **4.2.2. Formulación de dietas experimentales**

El uso de hidrolizados proteicos en las dietas experimentales se adicionó en forma de suplemento a un alimento comercial, es decir, se sustituyó un porcentaje en peso del alimento comercial por 1.5 y 3% de cada tipo de hidrolizado proteico, dando un total de 6 dietas suplementadas con hidrolizados de pollo, cerdo y pescado.

**Tabla 3.** Composición química de hidrolizados proteicos en base seca

(g/100g)	Hidrolizado		
	Pollo	Cerdo	Pez
Humedad	3.50	5.20	2.80
Cenizas	11.70	6.0	18.80
Proteína cruda	52.20	63.10	56.0
Grasas	27.70	20.50	18.10
Extracto libre de N	4.90	5.20	4.20
Digestibilidad (pepsina)	> 99.05	> 98.49	>96.70

Para el desarrollo de los alimentos formulados con larva de mosca soldado se realizó un balance teórico de los ingredientes seleccionados para el desarrollo de las dietas experimentales de acuerdo a su contenido de macronutrientes (proteína, lípidos y carbohidratos). Para llevar a cabo los balances de alimentos se utilizaron dos softwares para formulación de piensos: AFOS 2024 y EvaPig® 2020. A su vez, se utilizó la composición química teórica de los ingredientes de origen vegetal y animal proporcionada por los programas mismos y se corroboró con las Tablas de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos de la Federación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA) 2019. Para estos últimos, se formularon 3 dietas experimentales en las cuales se sustituyó el 0, 50 y 75% de la proteína de harina de pescado por proteína de larva de mosca soldado negra. Estas dietas se balancearon para ser isoproteicas, es decir, las tres dietas contenían 35% de proteína total.

#### **4.2.3. Elaboración de dietas experimentales**

Ya que se obtuvieron las proporciones de ingredientes correspondientes para la preparación de los alimentos, las harinas fueron homogenizadas en tamaño de partícula con un tamiz de malla #30; se mezclaron manualmente a una humedad del 30% aproximadamente y se sometieron a densificación por dos métodos diferentes: las dietas suplementadas con hidrolizados fueron procesadas en una peletizadora rotativa con dos rodillos de fricción y una matriz para obtener pellets de 6 mm de diámetro, estos fueron secados por 24 horas en un horno de convección a 60°C (Muin et al., 2017). Por otro lado, las dietas formuladas con

larva de mosca se sometieron a extrusión en un equipo extrusor de un tornillo con dos zonas de calentamiento e igualmente secadas a 60°C en un deshidratador eléctrico. Esto último en colaboración con el Laboratorio de Tecnología de Alimentos en el CICATA- IPN, Qro.

Posterior al procesamiento de las mezclas para obtener los alimentos experimentales, éstos se llevaron a análisis físico-químicos con el fin de confirmar su composición nutricional previo a su evaluación en el cultivo de tilapia.

#### **4.2.4. Análisis químicos alimentos**

La caracterización físico-química de los insumos como del alimento balanceado que se formuló se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro. Los análisis realizados se describen a continuación (AOAC, 2005):

##### **4.2.4.1. Determinación de humedad**

Crisoles de porcelana fueron sometidos a peso constante en estufa (marca Memmert) a temperatura de 105°C durante 24 horas. Posteriormente se pesaron de 2 a 5 g de la muestra para cada crisol utilizando una balanza analítica (Precisa LS220A); ya registrado el peso, los crisoles con la muestra se introdujeron nuevamente en la estufa hasta llegar al peso constante. El método utilizado fue el reportado en la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-211-SSA1-2002. El porcentaje de humedad se determinó por gravimetría con la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(P_2 - P_3)}{(P_2 - P_1)} * 100 \quad (1)$$

Donde:

P1 = Peso constante del crisol (g)

P2 = Peso del crisol + muestra húmeda (g)

P3 = Peso del crisol + muestra seca (g)

##### **4.2.4.2. Determinación de cenizas**

De acuerdo a lo reportado en método NMX-F-066-S-1978 de la norma para alimentos, las cenizas fueron obtenidas por incineración a 500°C en mufla (marca Felisa) por 6 horas. Después de este tiempo, los crisoles con las cenizas se dejaron enfriar en un desecador y se registró el peso final de éstos. El contenido de cenizas se calculó con la Ecuación 2:

$$Cenizas (\%) = \frac{(P2 - P1)}{M} * 100 \quad (2)$$

Donde:

P1 = Peso constante del crisol (g)

P2 = Peso del crisol + cenizas (g)

M = Peso de la muestra seca (g)

#### **4.2.4.3. Determinación de proteína cruda**

Se llevó a cabo el método de nitrógeno total de Kjeldahl para la cuantificación del contenido proteico de las diferentes muestras. Aproximadamente 0.2 g de muestra seca fueron sometidos a digestión ácida con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> grado reactivo al 30%. Para obtener el contenido de nitrógeno total, las digestiones se llevaron al espectrofotómetro UV-Vis DR/6000, HACH Company para realizar el método de Nessler (HACH 8075, 2010). El contenido de proteína cruda se calculó utilizando el factor 6.25 establecido para análisis en alimentos (Olvera-Novoa et al., 1993).

#### **4.2.4.4. Determinación de grasas totales**

Por medio de extracción soxhlet asistida con microondas (marca Anton Paar), se llevó a cabo la cuantificación de grasas de las muestras bajo el método EPA 3546 y utilizando como solución extractora hexanos y acetona 1:1. Los extractos fueron filtrados con papel filtro Whatman 42 y conservados en tubos de ensayo de vidrio previamente pesados. Ya que el solvente residual se evaporó completamente se calculó por gravimetría el contenido de grasas totales de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Grasas totales (\%) = \frac{(A - B)}{C} * 100 \quad (3)$$

Donde:

A = Peso del tubo + grasas (g)

B = Peso constante del tubo (g)

C = Peso de la muestra seca (g)

#### **4.2.4.5. Determinación de carbohidratos totales**

El contenido de azúcares de las muestras secas se determinó por el método de Antrona. Se pesaron 0.1 g de cada muestra en tubos de vidrio para ser sometidas a hidrólisis ácida con solución HCl 2.5 N en un termobaño (Thermo Scientific LabLine) por 3 horas a 95°C. Despues de éste tiempo y con las muestras a temperatura ambiente, se neutralizaron con CaCO<sub>3</sub>, se aforaron a 50 ml con agua destilada y se centrifugaron para conservar el sobrenadante. Se tomó una muestra de aproximadamente 1 ml del sobrenadante y se sometió a la reacción de Antrona por 8 min en ebullición. Para calcular el contenido de carbohidratos se preparó una curva de calibración con glucosa como estándar y se determinó la concentración a 630 nm en placa con un Multiskan (Thermo Scientific).

#### **4.2.4.6. Determinación de energía bruta**

Por medio de un calorímetro marca PARR modelo 6200 se determinó el contenido calórico de las muestras de acuerdo al método isoperibólico. Se elaboró un pellet de entre 0.5 y 1 g de muestra seca que se sometió al equipo a través de una bomba de combustión.

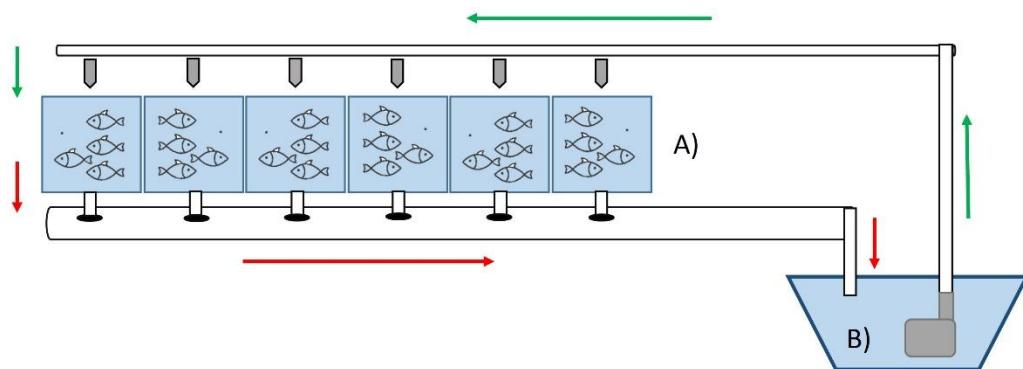
### **4.3. Evaluación de alimentos alternativos en cultivo de tilapia**

#### **4.3.1. Localización**

La evaluación de las diferentes dietas experimentales se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Campus Amazcala-Facultad de Ingeniería, ubicado en Amazcala, El Marqués, Querétaro. Ahí mismo, se instaló el sistema de cultivo de peces dentro del invernadero de producción acuícola del Laboratorio de Bioingeniería. En el invernadero se contaba con la infraestructura necesaria para la operación y mantenimiento del biosistema.

#### **4.3.2. Descripción del biosistema**

Para realizar el estudio de la bioenergética en tilapia se diseñó un sistema de cultivo con recirculación de agua y condiciones ambientales monitoreadas, esto con el fin de mantener a los organismos de experimentación bajo las mismas condiciones de prueba de alimentación alternativa. Este sistema constó de un rack con 5 niveles y seis peceras de 12 L por cada nivel, además, temperatura con calentadores cilíndricos de aluminio de 100 W, monitoreo de temperatura con sensores sumergibles. La Figura 3 muestra el diseño del sistema por cada uno de los niveles del rack.



**Figura 3.** Esquema del acomodo del sistema de recirculación del cultivo de tilapia. La recirculación de agua se indica con flechas. A) Peceras de 12 L, B) Reservorio para recirculación de agua

Para establecer la densidad de cultivo se realizaron pruebas previas dentro del sistema, colocando diferente cantidad de alevines por pecera y se determinó su crecimiento para conocer el efecto de la densidad sobre éste. El fin de la prueba fue disminuir el efecto de esta variable sobre los peces.

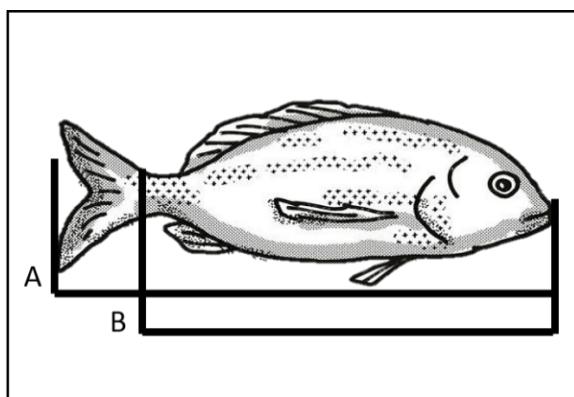
#### 4.3.3. Descripción del organismo

Respecto a los organismos de estudio, se cultivaron inicialmente tilapias de la especie *Oreochromis niloticus* de la variedad cruzada *aureusxmossambicus* de 2 meses de edad (etapa alevín) adquiridas del sistema de cultivo piloto del invernadero de producción acuícola, Campus Amazcala, Facultad de Ingeniería. Para la evaluación de las dietas experimentales se introdujeron 50 peces ( $0.79 \pm 0.08$ g) por alimento formulado con un acomodo de 10 organismos por pecera. La experimentación se llevó a cabo durante 45 días y la alimentación se proporcionó con una frecuencia de 4 veces al día ajustando la cantidad

de alimento de acuerdo al aumento de la biomasa con una ración del 10% al día. Las dietas suministradas fueron las descritas en la sección previa 4.2.3.

#### 4.3.4. Biometrías

El peso húmedo y talla de los organismos se determinó cada dos semanas a partir del inicio de la experimentación. El peso se midió con una balanza Precisa BJ610C en la que se colocó un vaso con agua y donde se introdujo al pez para registrar su peso en gramos. La talla se tomó como se muestra en la Figura 4 con ayuda de un vernier marca Mitutoyo Absolute IP67.



**Figura 4.** Esquema de la toma de longitud total (A) y longitud patrón (B) para peces.

#### 4.3.5. Variables asociadas a la producción

A partir de la toma de datos biométricos durante todo el tiempo de experimentación se calcularon los siguientes parámetros:

- Supervivencia (%):

$$\frac{\text{Organismos finales}}{\text{Organismos iniciales}} * 100 \quad (7)$$

- Peso ganado (%): este parámetro indica cuánto peso ganó el individuo en un período de tiempo.

$$\frac{\text{Peso final} - \text{peso inicial}}{\text{Peso inicial}} * 100 \quad (8)$$

- Tasa Específica de Crecimiento (%/día): indica la tasa a la que se aumenta el crecimiento del individuo en un período de tiempo.

$$\frac{\ln(peso\ final) - \ln(peso\ inicial)}{días\ del\ experimento} * 100 \quad (9)$$

- Peso ganado individual (g/día): indica cuanto aumenta en peso un individuo en promedio por día.

$$\frac{Peso\ final - peso\ inicial}{Edad\ en\ días} \quad (10)$$

- Alimento consumido individual (g/día): cuanto alimento consume un individuo en promedio por día.

$$\frac{\varepsilon\ Alimento\ individual\ dado\ por\ semana}{Número\ de\ días} \quad (11)$$

- Tasa de Conversión Alimenticia: eficiencia con la que los individuos convierten el alimento ingerido en biomasa. Valores bajos indican gran eficiencia en el uso del alimento.

$$\frac{Alimento\ ingerido}{Peso\ ganado} \quad (12)$$

- Relación de eficiencia proteica (P.E.R.): este parámetro da una idea de la calidad de la proteína, si el pez no crece, este valor será de 0.

$$\frac{Peso\ ganado\ individual}{Consumo\ de\ proteína} \quad (13)$$

- Factor de condición (F.C.): estima el estado de salud de los organismos de acuerdo a su crecimiento.

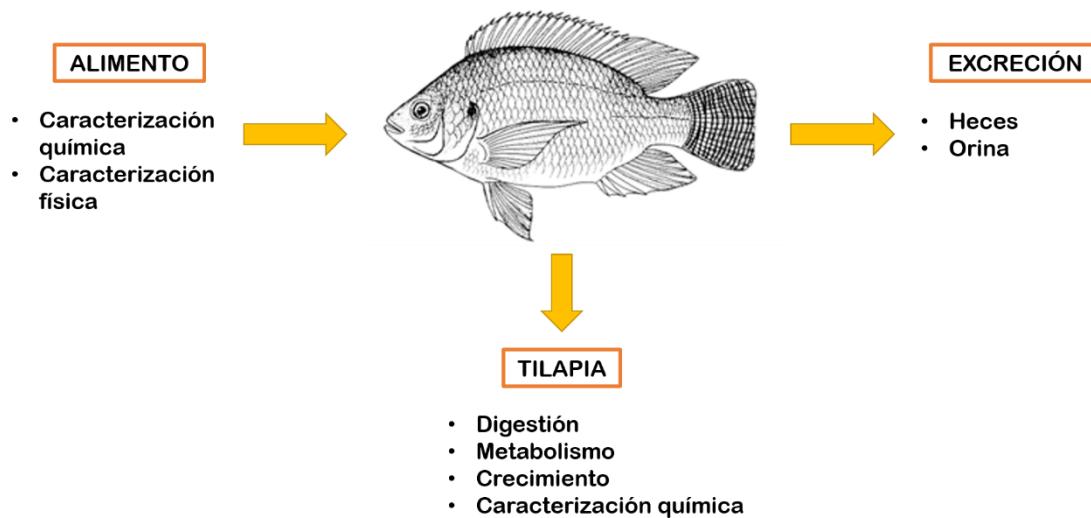
$$\frac{Peso\ final}{Longitud\ total^3} * 100 \quad (14)$$

#### 4.3.6. Monitoreo de la calidad del agua

Durante el tiempo experimental, cada tercer día se realizó la medición de variables como la temperatura, oxígeno disuelto y pH correspondientes al sistema de cultivo. Esto se llevó a cabo por medio de un equipo multiparamétrico portátil (HACH, H140d). Asimismo, la concentración de compuestos nitrogenados se monitoreó semanalmente: NO<sub>2</sub> y NO<sub>3</sub> por el método de diazotización (HACH 8507, 2010) y N-NH<sub>3</sub> por el método de Nessler (HACH 8038, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 4500-NH<sub>3</sub> B&C).

#### 4.4. Evaluación de la eficiencia bioenergética de alimentos alternativos

Para la determinación de los elementos involucrados en la energética nutricional existen diversos métodos que se realizaron en diferentes momentos del cultivo de peces. La Figura 5 muestra gráficamente las determinaciones que se llevaron a cabo durante el análisis bioenergético:



**Figura 5.** Elementos a determinar para el análisis del balance bioenergético en tilapia del Nilo alimentada con dietas alternativas.

Cada una de las determinaciones que se describen a continuación permitirán completar la ecuación  $C = P + R + F + U$  correspondiente al balance bioenergético previamente descrito.

##### 4.4.1. Tasa de ingestión (C)

Tasa útil para conocer el aporte de energía de un alimento. Para evaluar C los animales fueron alimentados en su primera toma con la cantidad de alimento balanceado correspondiente a su biomasa, se dejó el alimento en la pecera por dos horas para después recuperar todo el alimento no consumido con ayuda de una manguera de 10 mm. Filtrar el agua de la recuperación de alimento con papel filtro Watmann 100 pre pesado y se colocó en estufa a 60°C por 48 horas. Se calculó por gravimetría el peso de alimento no consumido.

##### 4.4.2. Metabolismo aerobio (R) y excreción nitrogenada (U)

Determinadas y calculadas por el método de respirometrías por cámaras semi-cerradas. Este método consistió en hacer mediciones de la concentración de oxígeno en una cámara de

volumen conocido al principio y al fin de un lapso de tiempo. Se utilizaron matraces de 1 L como cámaras respirométricas semi-cerradas, cada matraz contenía únicamente un pez. Se monitoreó durante 24 horas continuas, midiendo cada 4 horas el oxígeno disuelto y tomando aproximadamente 30 ml de agua por cada cámara para realizársele análisis de Amonio por el método Nessler (Método HACH 8038, 2010; Adaptado de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 4500-NH<sub>3</sub> B & C). Este método considera que la reducción de oxígeno en la cámara depende del peso del animal, el volumen de agua, la duración del experimento y la temperatura del ambiente (García-Trejo et al., 2013).

#### **4.4.3. Tasa de producción de heces (F)**

Correspondiente a la pérdida de energía a través de la fracción de alimento no absorbido. Se realizó la recolecta de heces 2 horas después de haber alimentado a los peces con ayuda de sifón y malla de 100 µm. Posteriormente las heces fueron lavadas con agua destilada para eliminación de sales y se dispusieron a secar a 60°C por 48 horas en papel aluminio. Para determinar la digestibilidad de los alimentos alternativos formulados se llevó a cabo el método de cenizas insolubles en ácido, ampliamente utilizado en nutrición acuícola. Al momento de preparar los alimentos se adicionó 1% del biomarcador celite; para llevar a cabo la determinación es necesario recolectar las heces de los peces durante el tiempo de experimentación hasta obtener la cantidad muestra necesaria (Peres et al., 2022) .

#### **4.4.4. Composición físico-química del pez**

Al finalizar el tiempo experimental, se seleccionó una muestra de peces por cada tratamiento para determinar su composición de energía, proteína, lípidos, humedad y cenizas, utilizando los métodos descritos previamente.

#### **4.4.5. Crecimiento (P)**

Por medio de la toma de biometrías, descritas anteriormente en la sección 4.3.4., se calculó y analizó el crecimiento de los alevines a partir del registro de su peso y talla.

#### **4.4.6. Análisis estadístico**

El diseño experimental utilizado para realizar las pruebas de alimentación con los organismos fue de bloques con acomodo al azar. Los datos obtenidos en la fase experimental fueron

analizados con el software estadístico Statgraphics Centurion XVIII. Las variables dependientes de los tratamientos (peso, talla, parámetros productivos y variables asociadas a la bioenergética) fueron sometidos primeramente a una prueba de Levenes para evaluar las varianzas de los datos generados. El método empleado para discriminar entre las medias fue ANOVA y Tukey como prueba post hoc, así como prueba de Kruskall-Wallis para el balance bioenergético con 95% de confianza, dependiendo de las diferencias estadísticas que mejor se ajustaran a los resultados.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Alimentos experimentales suplementados con hidrolizados proteicos

#### 5.1.1. Elaboración y caracterización de dietas

Para la primera fase de la presente experimentación se obtuvo la caracterización química de las dietas suplementadas con 1.5 y 3% de hidrolizados proteicos. Para cada una de las dietas experimentales se observa un mayor contenido de proteína (< 40 %) comparadas con la dieta control (39%). Así mismo, despendiendo del tipo de hidrolizado se observó un cambio en el contenido de proteína y grasas.

**Tabla 4.** Comparación de la composición química de dietas experimentales suplementadas con hidrolizados proteicos

Composición química (%)	Dietas experimentales (Hidrolizados)						
	Control	Pollo 1.5	Pollo 3	Cerdo 1.5	Cerdo 3	Pez 1.5	Pez 3
<b>Humedad</b>	7.12±0.13 <sup>c</sup>	8.22±0.13 <sup>ab</sup>	8.34±0.11 <sup>a</sup>	7.97±0.02 <sup>b</sup>	6.23±0.09 <sup>e</sup>	7.33±0.08 <sup>c</sup>	6.81±0.08 <sup>d</sup>
<b>Cenizas</b>	11.72±0.11 <sup>a</sup>	11.88±0.24 <sup>a</sup>	11.58±0.07 <sup>a</sup>	11.41±0.25 <sup>a</sup>	11.36±0.38 <sup>a</sup>	11.77±0.93 <sup>a</sup>	12.22±0.07 <sup>a</sup>
<b>Grasas</b>	6.52±0.11 <sup>a</sup>	2.37±0.08 <sup>b</sup>	2.19±0.12 <sup>b</sup>	6.65±0.45 <sup>a</sup>	6.61±0.32 <sup>a</sup>	5.73±0.33 <sup>a</sup>	5.66±0.93 <sup>a</sup>
<b>Proteína</b>	39.09±1.32 <sup>b</sup>	41.19±0.54 <sup>ab</sup>	41.14±1.11 <sup>ab</sup>	41.56±0.58 <sup>ab</sup>	43.50±0.24 <sup>a</sup>	40.62±1.25 <sup>ab</sup>	40.03±1.14 <sup>ab</sup>
<b>Carbohidratos totales</b>	20.72±0.99 <sup>bc</sup>	20.42±1.63 <sup>c</sup>	21.09±3.35 <sup>a</sup>	24.34±4.61 <sup>abc</sup>	21.26±1.62 <sup>ab</sup>	21.71±1.13 <sup>ab</sup>	21.74±1.22 <sup>abc</sup>
<b>Energía bruta (Kcal/g)</b>	4.70±9.27 <sup>a</sup>	4.41±9.94 <sup>d</sup>	4.42±17.23 <sup>d</sup>	4.58±6.98 <sup>c</sup>	4.66±7.24 <sup>ab</sup>	4.58±18.05 <sup>c</sup>	4.63±14.85 <sup>b</sup>

Promedio ± Desv. Est. (n = 3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

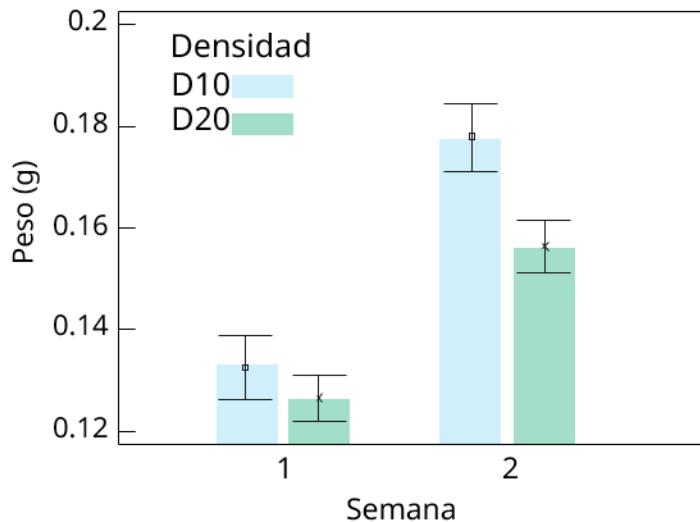
Se puede observar en la Tabla 4 que tanto la dieta convencional como las dietas experimentales se encuentran dentro de los requerimientos de proteína para alevín de tilapia (> 35%). Los hidrolizados proteicos como aditivos aumentaron el contenido de proteína de las dietas y lograron mantener el contenido de grasas conforme a la dieta control, a excepción del hidrolizado de pollo. Por otra parte, el contenido energético de las dietas se determinó como superior a 4 Kcal/g, contenido que cumple con el requerimiento de energía para el crecimiento de alevines de tilapia (El-Sayed & Teshima, 1992).

### **5.1.2. Evaluación del biosistema (cultivo de tilapia)**

Ya que se puso en marcha el sistema de cultivo, como se muestra en la Ilustración 1, se realizó la prueba de densidad de cultivo con el fin de disminuir el efecto de esta variable sobre el crecimiento del pez. Los resultados de crecimiento determinados se muestran en la Figura 6.



**Ilustración 2.** Biosistema de cultivo utilizados para la evaluación de dietas experimentales



**Figura 6.** Comparación del peso obtenido en alevines de tilapia cultivadas en dos densidades diferentes ( $n = 10$  y  $20$ , respectivamente). Fisher LSD 95% I.C.

### 5.1.3. Evaluación de dietas suplementadas con hidrolizados proteicos

El cálculo de las variables asociadas a la producción obtenidas del cultivo experimental de alevines de tilapia se presenta en la Tabla 5. De acuerdo a éstos, existe una diferencia significativa en la mayoría de las variables en comparación con el control, es decir, las dietas suplementadas con hidrolizados generaron valores superiores a los peces alimentados con una dieta comercial. De forma particular, las dietas suplementadas con hidrolizado de cerdo y pez destacan respecto al resto de las dietas experimentales.

**Tabla 5.** Comparación de las variables asociadas a la producción de un cultivo de tilapia alimentado con suplemento de hidrolizados proteicos

	Dietas experimentales (Hidrolizados)						
	Control	Pollo 1.5	Pollo 3	Cerdo 1.5	Cerdo 3	Pez 1.5	Pez 3
<b>Peso inicial (g)</b>	$0.73 \pm 0.02$	$0.79 \pm 0.03$	$0.80 \pm 0.01$	$0.72 \pm 0.01$	$0.96 \pm 0.34$	$0.75 \pm 0.02$	$0.77 \pm 0.02$
<b>Peso final (g)</b>	$6.47 \pm 3.19$	$7.70 \pm 2.78$	$7.81 \pm 2.90$	$8.97 \pm 3.09$	$13.52 \pm 3.99$	$10.19 \pm 2.60$	$10.06 \pm 2.93$
<b>Supervivencia (%)</b>	$88.09 \pm 4.12$	$88.09 \pm 4.12$	$90.47 \pm 4.12$	$95.23 \pm 8.25$	$85.71 \pm 14.2$	$83.33 \pm 4.12$	$73.80 \pm 14.8$

<b>Peso ganado (%)</b>	145.69±15.92 <sup>b</sup>	367.54±59.15 <sup>ab</sup>	314.03±44.89 <sup>ab</sup>	399.08±51.04 <sup>a</sup>	506.68±20.6.54 <sup>a</sup>	488.71±37.33 <sup>a</sup>	508.74±50.73 <sup>a</sup>
<b>T.E.C. (%/día)</b>	1.49±0.10 <sup>b</sup>	2.56±0.21 <sup>a</sup>	2.36±0.17 <sup>a</sup>	2.67±0.17 <sup>a</sup>	2.92±0.63 <sup>a</sup>	2.95±0.10 <sup>a</sup>	3.00±0.13 <sup>a</sup>
<b>T.C.A.</b>	3.29±0.26 <sup>b</sup>	2.09±0.18 <sup>a</sup>	2.27±0.24 <sup>a</sup>	2.02±0.24 <sup>a</sup>	1.84±0.23 <sup>a</sup>	1.87±0.02 <sup>a</sup>	1.92±0.11 <sup>a</sup>
<b>P.E.R.</b>	0.76±0.06 <sup>b</sup>	1.20±0.11 <sup>a</sup>	1.11±0.12 <sup>a</sup>	1.25±0.14 <sup>a</sup>	1.37±0.17 <sup>a</sup>	1.33±0.01 <sup>a</sup>	1.30±0.07 <sup>a</sup>
<b>F.C.</b>	1.45±0.01	1.48±0.01	1.39±0.01	1.45±0.00	1.45±0.02	1.44±0.01	1.42±0.01

T.E.C. = Tasa específica de crecimiento, T.C.A.= Tasa de conversión alimentaria, P.E.R.= Razón de eficiencia proteica, F.C.= Factor de condición. Promedio ± Desv. Est. (n=3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

La suplementación de hidrolizados proteicos de origen animal en las dietas de la tilapia del Nilo proporcionaron efectos favorables en el rendimiento del crecimiento de los peces. Del mismo modo, estos hallazgos concuerdan con informes anteriores que estudiaron la inclusión de hidrolizados en la alimentación de diferentes especies acuáticas (Siddik et al., 2021b; Suratip et al., 2023b).

La Tabla 5 muestra un efecto altamente significativo en el rendimiento del crecimiento de la tilapia, lo que se traduce en un incremento del triple en el aumento de peso de los peces alimentados con suplementos de hidrolizados proteicos (hasta 508.7%) en comparación con la dieta de control (145.6%). Estos resultados concuerdan con los publicados por Herault et al. (2023), quien observó mejoras significativas en el crecimiento, la utilización del alimento y la digestibilidad de las dietas de la dorada roja cuando se les administró un suplemento del 5 % de hidrolizado derivado de subproductos pesqueros. Por otra parte, Wu et al. (2022) obtuvieron una respuesta similar; los autores probaron un hidrolizado derivado de subproductos avícolas como sustituto de la harina de pescado y observaron un incremento en el peso final de la carpa. A diferencia de estos estudios, las dietas experimentales formuladas en este trabajo no sustituyeron la inclusión de harina de pescado, sino que solo se añadieron 1,5 y 3 % (p/p) de cada hidrolizado como suplemento para la alimentación de los peces. Además, el incremento del peso fresco, el peso vivo y la tasa de crecimiento específico de los peces alimentados con hidrolizados podría estar relacionado con la aceptación del pienso y la asimilación favorable debido a los péptidos cortos que conforman los hidrolizados. Se ha descrito una mejora en la digestión del pienso y la asimilación de nutrientes con la utilización de hidrolizados, lo que afecta directamente a la producción de biomasa de los

peces y está relacionado con las propiedades nutricionales, funcionales y bioactivas del hidrolizado (Villamil et al., 2017). Los resultados de la Tabla 3 indican que los hidrolizados proteicos evaluados en este estudio presentan una digestibilidad proteica superior al 96 %, lo que podría estar relacionado con una mayor biodisponibilidad de los péptidos y una mayor utilización de las proteínas. El efecto de esta característica química se refleja en el rendimiento del crecimiento de los peces alimentados con dietas experimentales; sin embargo, es necesario seguir investigando el perfil de aminoácidos y la caracterización de los biopéptidos. El factor de conversión alimentaria (T.C.A.) calcula la cantidad de alimento necesaria para el crecimiento de los organismos, en particular la cantidad de alimento necesaria para producir un gramo de biomasa. A partir de esto, cuanto menor sea el valor, más viable será el alimento para el consumo de los peces. Todas las dietas suplementadas con hidrolizados proteicos generaron valores bajos de T.C.A. (menores a 2) y los peces mantuvieron su aumento de peso; por lo tanto, en comparación con la dieta de control, se podría considerar que el hidrolizado permite una mejor utilización del pienso. Estos resultados son similares a los obtenidos por Trung et al. (2022), que incluyeron un 3 % y un 5 % de hidrolizado derivado de subproductos de camarón en las dietas de la trucha arcoíris.

De acuerdo a los resultados presentados, a pesar de que todas las dietas suplementadas tienen efectos favorables en el desarrollo de la tilapia del Nilo, pueden existir diferencias entre los distintos tipos de hidrolizados. Las características de los hidrolizados proteicos, como su método de producción, el grado de hidrólisis y la fuente de obtención, influyen en la utilización del hidrolizado por parte de los peces. Los piensos con *H. Pez* presentaron valores superiores en la mayoría de las variables asociadas al crecimiento, seguidos de las dietas suplementadas con *H. Cerdo* y, por último, las dietas con *H. Pollo*. Particularmente, el hidrolizado derivado del pescado y sus subproductos se ha aplicado constantemente en la acuicultura debido a sus efectos favorables en el desarrollo de los organismos acuáticos, gracias a su perfil equilibrado de aminoácidos, su contenido en ácidos grasos y sus péptidos funcionales (Swanepoel & Goosen, 2018). Además, muchos estudios han informado sobre la inclusión de hidrolizado de pescado en la alimentación de diferentes especies acuáticas y marinas, y los autores sugieren su adición como sustituto parcial de la harina de pescado, aditivo o suplemento para los piensos acuáticos (Siddik et al., 2021c). Los resultados presentados en la Tabla 5 muestran que las dietas *H. Cerdo* 3 y *H. Pez* 3 generaron un

aumento de peso y valores de tasa específica de crecimiento superiores, lo que sugiere una mejor utilización del pienso a medida que aumenta la inclusión de hidrolizado de este tipo. En relación con estos resultados, Gisbert et al. (2012) comparó el hidrolizado de sangre de pescado y cerdo para la alimentación de larvas de *Spaurus aurata*, lo que sugiere que el hidrolizado de cerdo es un sustituto proteico viable al 9 % y al 12 %, debido a que el contenido de aminoácidos hidrolizados, dipéptidos y tripéptidos es adecuado para las necesidades nutricionales de la especie. Por otro lado, los valores obtenidos con las dietas H. Pollo fueron significativamente diferentes de los del control, pero con valores más bajos en comparación con el resto de las dietas experimentales. A pesar de que se ha informado de una menor digestibilidad de la proteína hidrolizada de subproductos avícolas en la alimentación de camarones, también se sugirió como fuente de proteínas, aunque el grado de hidrólisis y el método de producción podrían modificar su contenido de aminoácidos y péptidos, lo que afectaría a su aprovechamiento (Soares et al., 2020). Cabe señalar que los hidrolizados utilizados en este estudio se obtuvieron mediante hidrólisis enzimática; este método mantuvo la integridad de los péptidos y la calidad de las proteínas, mejorando la absorción de nutrientes (Hou et al., 2017b). Según esta información, las diferencias observadas en los valores de relación de eficiencia proteica (P.E.R.) con respecto a la dieta de control podrían estar relacionadas con el contenido de aminoácidos y péptidos de los hidrolizados. En particular, H. Pez es el suplemento con mayor retención de proteínas en el rendimiento de los alevines de tilapia del Nilo en este estudio. (Chalamaiyah et al., 2012) informó de que los aminoácidos esenciales para el crecimiento de los peces se encuentran en abundancia en los hidrolizados de proteínas de pescado. El porcentaje de inclusión de cada tipo de hidrolizado genera diferencias significativas solo en las dietas con H. Cerdo. Para obtener resultados positivos en el rendimiento del crecimiento de los peces, se ha informado de un nivel de inclusión de hidrolizado inferior al 20 % de sustitución de la harina de pescado o una suplementación inferior al 10 % en la dieta (Martínez-Alvarez et al., 2015b; Siddik et al., 2021c). En todos los casos de este estudio, los porcentajes de suplementación se probaron según lo informado por otros autores sin afectar negativamente el desarrollo de las tilapias, y se obtuvieron mejores resultados con una suplementación de hidrolizado proteico del 3 %.

#### **5.1.4. Monitoreo de la calidad de agua del cultivo**

Los resultados mostrados en la Tabla 6 relacionados con la calidad de agua del cultivo de alevines de tilapia demuestra que todos los parámetros determinados se encuentran por debajo de los valores de referencia. La presencia de altas concentraciones de nitritos y nitratos en el agua de cultivo pueden resultar tóxicas para los peces, ya que afectan el funcionamiento de la hemoglobina y la disminución de actividad del sistema inmune. A pesar de ello, la tilapia es una especie robusta que logra soportar hasta 81 mg/L de nitritos y 500mg/L de nitratos sin afectar su desarrollo (Atwood et al., 2001;Monsees et al., 2017). La presencia de amonio en un cultivo es derivada del uso de proteína como fuente energética por los peces, sin embargo, un exceso de este puede provocar un efecto negativo en el crecimiento del organismo, por lo tanto, es necesario el balance de proteína con fuentes energéticas como carbohidratos y lípidos en la alimentación (Moraes and de Almeida, 2020).

**Tabla 6.** Variables monitoreadas para la calidad de agua del cultivo de tilapia alimentadas con suplemento de hidrolizados proteicos

	Dietas experimentales (Hidrolizados)						
	Pollo 1.5	Pollo 3	Cerdo 1.5	Cerdo 3	Pez 1.5	Pez 3	Control
<b>Nitritos</b>	0.61±0.73	0.38±0.48	0.65±0.87	0.50±0.58	1.12±1.2	0.19±0.16	0.58±0.48
<b>Nitratos</b>	4.6±2.00 <sup>b</sup>	4.06±0.57 <sup>b</sup>	4.38±1.44 <sup>b</sup>	6.32±1.40 <sup>ab</sup>	8.08±3.08 <sup>a</sup>	3.72±1.16 <sup>b</sup>	2.9±0.72 <sup>b</sup>
<b>N- Amoniacal</b>	0.45±0.46	0.60±0.86	0.74±1.17	0.36±0.36	0.56±0.62	0.30±0.19	0.62±0.31
<b>pH</b>	6.8±0.77	6.90±0.58	6.92±0.49	6.94±0.43	6.96±0.36	6.96±0.35	7.40±0.32

Promedio ± Desv. Est. (n= 3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

### 5.1.5. Evaluación bioenergética

Parte de los elementos involucrados en el balance energético son los asociados al metabolismo aerobio del pez, el consumo de oxígeno (respiración) y la excreta de amonio (orina), resultados que se presentan en la Tabla 7. Se puede observar que las dietas experimentales tuvieron un menor consumo de oxígeno respecto al control (p<0.05), presentando valores entre 0.56 y 0.76 mg/L/g pez. Así mismo, la excreción de amonio se vio afectada por el tipo de alimento, pero sin obtener diferencias significativas. Por otra parte, la razón O:N asocia el valor calculado con el tipo de sustrato que se está metabolizando.

**Tabla 7.** Variables asociadas al metabolismo aerobio de tilapia alimentada con dietas experimentales suplementadas con hidrolizados proteicos

	Dietas experimentales (Hidrolizados)						
	Control	Pollo 1.5	Pollo 3	Cerdo 1.5	Cerdo 3	Pez 1.5	Pez 3
<b>Consumo O<sub>2</sub> (mg/L/g pez)</b>	2.46 ± 0.30 <sup>a</sup>	0.62 ± 0.13 <sup>b</sup>	0.68 ± 0.18 <sup>b</sup>	0.63 ± 0.05 <sup>b</sup>	0.56 ± 0.11 <sup>b</sup>	0.76 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.64 ± 0.12 <sup>b</sup>
<b>Excreción NH<sub>4</sub> (mg/L/g pez)</b>	0.092 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.014 ± 0.008 <sup>b</sup>	0.024 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.017 ± 0.004 <sup>b</sup>	0.015 ± 0.007 <sup>b</sup>	0.026 ± 0.005 <sup>b</sup>	0.017 ± 0.01 <sup>b</sup>
<b>Razón O:N</b>	23.78 ± 4.38 <sup>a</sup>	37.07 ± 12.95 <sup>a</sup>	24.27 ± 5.54 <sup>a</sup>	29.46 ± 4.70 <sup>a</sup>	28.73 ± 4.37 <sup>a</sup>	23.45 ± 3.69 <sup>a</sup>	26.68 ± 3.50 <sup>a</sup>

Promedio ± Desv. Est. (n=3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

La medición del consumo de oxígeno se ha asociado con la pérdida de energía en los peces debido a su actividad metabólica (Nelson, 2016). Los cambios en las condiciones ambientales de desarrollo de los peces, como la alimentación, provocan un incremento de la actividad metabólica con el fin de conservar su energía de mantenimiento, pero sacrificando la producción de biomasa (Jobling, 2017b). Esta energía de mantenimiento puede estimarse midiendo el metabolismo basal, que representa el estado de homeostasis del organismo (Nelson, 2016). Según esta información y los resultados obtenidos en este estudio, las dietas suplementadas con hidrolizados proporcionaron la energía necesaria para abastecer el metabolismo basal de la tilapia, observándose un menor consumo de oxígeno en comparación con la dieta de control. Esta aportación energética de las dietas suplementadas permite entonces que los peces dispongan de energía suficiente para su crecimiento, resultados que coinciden con los presentados en la Tabla 5. Además, la suplementación de hidrolizados en la alimentación de la tilapia favorece un mayor estado de homeostasis a pesar de la inclusión de un nuevo ingrediente en las dietas. En particular, no se obtuvieron diferencias significativas entre los tipos de hidrolizados, pero sí se observaron diferencias con respecto al control. Por otra parte, la cuantificación de la excreción de amonio está relacionada con el metabolismo del nitrógeno y se utiliza para estimar la utilización de nutrientes (principalmente proteínas) por parte del organismo (Engin et al., 2013).

Los resultados obtenidos presentaron diferencias significativas en comparación con la dieta de control, observándose una disminución en la excreción de amonio de los peces alimentados con hidrolizados de proteínas. Dado que la caracterización de los hidrolizados presenta una digestibilidad proteica superior al 96 % y se observa una disminución en la excreción de amonio, se deduce que los hidrolizados proporcionan los péptidos y aminoácidos que necesitan los peces para satisfacer su demanda energética basal, en comparación con la dieta de control. Asimismo, la disminución de la excreción de amonio por las dietas experimentales puede estar relacionada con la calidad de sus proteínas; sin embargo, es necesario complementar esta información con el análisis del perfil aminoácido de los hidrolizados, así como con la determinación del metabolismo de los aminoácidos esenciales para corroborar su uso energético en el momento del consumo de alimento. Los valores calculados a partir de la relación de ambas variables (relación O:N) permiten obtener datos que, según el rango en el que se encuentren, estiman el tipo de sustrato que el pez está metabolizando: los valores inferiores a 10 se refieren al metabolismo de las proteínas; los resultados superiores a 10 indican el metabolismo de los lípidos y los carbohidratos (Cao & Wang, 2014; Mayzaud & Conover, 1988). Los resultados que se muestran en la Tabla 6 indican que, para todas las dietas experimentales evaluadas en este estudio, la energía se obtuvo del catabolismo de los lípidos y los carbohidratos sin diferencias significativas.

Otra parte propia del balance bioenergético es la determinación del consumo de alimento, excreción de heces y su conversión en unidades de trabajo para relacionarlas con la ecuación del balance bioenergético, resultados que se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Elementos del balance energético determinados en un cultivo de tilapia alimentada con dietas experimentales

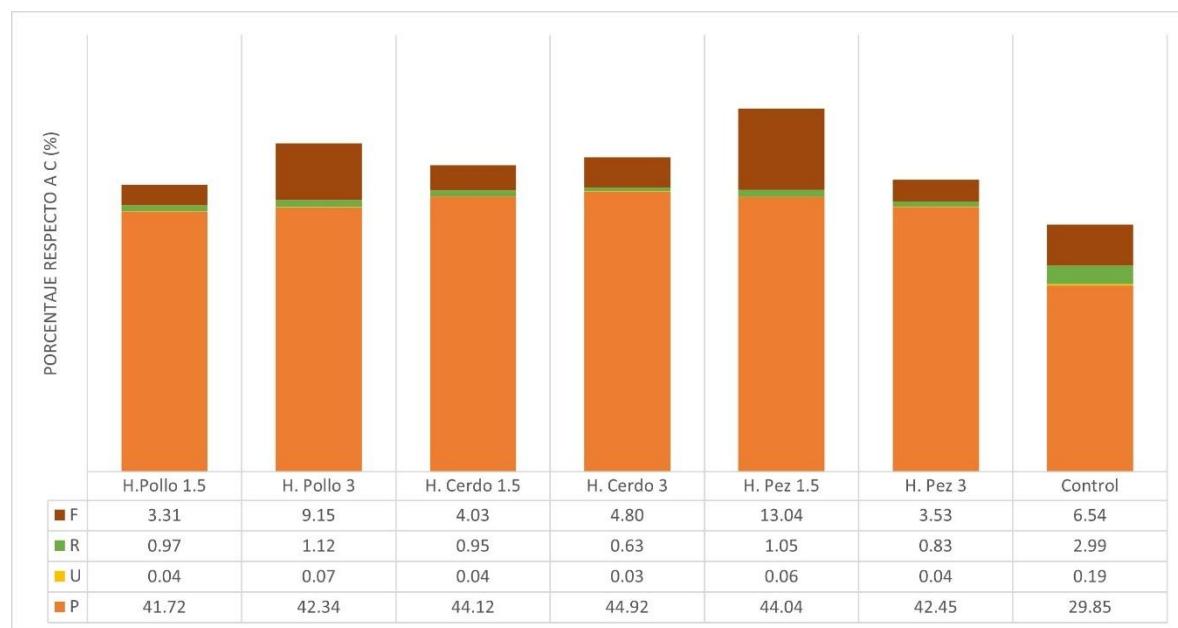
(J/g/día)	Dietas experimentales (Hidrolizados)						
	Control	Pollo 1.5	Pollo 3	Cerdo 1.5	Cerdo 3	Pez 1.5	Pez 3
<b>P</b>	351.93 <sup>a</sup>	754.41	732.97	831.09	1151.03 <sup>b</sup>	894.23	934.64
<b>R</b>	34.68 <sup>a</sup>	17.56	19.33	17.91	15.98 <sup>b</sup>	21.37	18.12
<b>U</b>	2.19 <sup>a</sup>	0.67 <sup>b</sup>	1.17	0.81	0.72	1.26	0.83
<b>F</b>	75.84	59.86 <sup>a</sup>	158.13	75.84	122.63	264.63 <sup>b</sup>	77.45
<b>C</b>	1168.18 <sup>a</sup>	1808.04	1730.71	1883.25	2560.08 <sup>b</sup>	2029.82	2202.89

<b>Energía Digerible (ED)</b>	1228.97	1419.29	1511.85	1782.25	2626.12	2009.70	1899.76
<b>Energía Metabolizable (EM)</b>	1228.09	1419.15	1511.60	1782.06	2625.96	2009.43	1899.57
<b>Eficiencia energética (%)</b>	98	98.92	95.9	98.2	97.96	95.46	97.92

Los resultados se muestran como valores promedio. (n=3). Superíndices indican diferencias significativas (p<0.05)

A partir de las variables determinadas se realizó el balance energético de los alevines de tilapia distribuyendo por porcentaje respecto a la energía inicial consumida (C), esto con el fin de estimar y comprender la repartición energética por parte del alimento en el organismo. De acuerdo con el modelo utilizado en este estudio para la estimación del balance energético, la cantidad de energía consumida por el pez en el alimento (C) idealmente será igual a la suma de todas las expediciones de energía propias del organismo, en este caso crecimiento (P), metabolismo (R), heces y orina (F y U); no obstante, debido a la complejidad para determinar de forma certera estas variables, los valores son ajustados por estimación gracias al mismo modelo (Madenjian et al., 2011). Con los resultados obtenidos se puede observar que los hidrolizados proteicos permiten un aumento en la energía dispuesta al crecimiento, principalmente para las dietas con H. pez 1.5 y 3, así como con la dieta H. cerdo 3. Los valores energéticos relacionados con los residuos del metabolismo (U y F) son los que presentaron una menor proporción energética en la estimación para todos los tratamientos, esto esta acorde a lo propuesto por (Xie et al., 2011). Ambas variables se ven afectadas por la energía del alimento, a baja energía de consumo, menor va a ser la energía de desecho ya que el organismo necesita aprovechar al máximo el alimento. Respecto a R, que es el consumo de oxígeno asociado al metabolismo basal, se observa que las dietas con hidrolizados generaron un menor gasto energético en comparación con la dieta control. De acuerdo con (Xie et al., 2011), la determinación de esta variable se puede asociar a la energía calórica (HE, heat energy por sus siglas en inglés) propia del pez al momento de estar metabolizando el alimento y la cuál solamente se puede estimar conforme a las variables que si son medibles efectivamente. En este caso se ha reportado que esta energía equivale hasta un 50% del balance energético, es por esto que en muchos casos, la suma de las variables que si son determinadas, como P, F, U, no alcanzan el valor que se determina para C. La Figura

7 muestra de forma gráfica la distribución de energía respecto al consumo de alimento. A partir de esto, es posible estimar la energía digerible, metabolizable y finalmente la eficiencia energética. Si bien los resultados obtenidos en la Tabla 8 muestran una menor eficiencia energética en las dietas con hidrolizados, se ha reportado que la eficiencia energética de los peces puede disminuir conforme aumenta su peso debido a que su gasto energético incrementa para su mantenimiento y en algunos casos, priorizando también el desarrollo del sistema inmunológico (Martínez-Porcha et al., 2009). Esto está en relación con los resultados obtenidos respecto a las variables de crecimiento, ya que las dietas con menor eficiencia energética son las que presentaron una mayor ganancia de peso en el cultivo experimental (H. Cerdo y H. Pez).



**Figura 7.** Comparación de la proporción energética en porcentaje de las variables asociadas a la bioenergética de alevines de tilapia con base en la energía consumida (C). Variables energéticas asociadas a heces (F), metabolismo (R), excreción nitrógeno (U) y crecimiento (P). N = 3.

### 5.1.6. Composición química de los alevines

La determinación de la composición química de los peces alimentados con dietas experimentales permite estimar como es la distribución de los nutrientes en la carcasa del pez. En la Tabla 9 se resumen los resultados de su caracterización química y en los cuáles se observan diferencias significativas en el contenido de grasas principalmente. El contenido de

proteína no se vio afectado significativamente por la suplementación de hidrolizados proteicos en las dietas para alevín de tilapia.

**Tabla 9.** Comparación de la caracterización química de tilapia alimentada con dietas experimentales

Composición química (%)	Dietas experimentales (Hidrolizados)						
	Control	Pollo 1.5	Pollo 3	Cerdo 1.5	Cerdo 3	Pez 1.5	Pez 3
<b>Humedad</b>	77.88 $\pm$ 2.15 <sup>a</sup>	76.98 $\pm$ 0.53 <sup>a</sup>	75.36 $\pm$ 1.93 <sup>a</sup>	74.82 $\pm$ 0.19 <sup>a</sup>	75.27 $\pm$ 0.88 <sup>a</sup>	78.09 $\pm$ 0.51 <sup>a</sup>	74.9 $\pm$ 0.41 <sup>a</sup>
<b>Cenizas</b>	3.79 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	4.44 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	4.46 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>	4.55 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	4.69 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	4.16 $\pm$ 0.43 <sup>a</sup>	4.61 $\pm$ 0.007 <sup>a</sup>
<b>Grasas</b>	3.62 $\pm$ 0.36 <sup>c</sup>	3.46 $\pm$ 0.19 <sup>c</sup>	4.52 $\pm$ 0.06 <sup>ab</sup>	4.69 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	3.84 $\pm$ 0.01 <sup>bc</sup>	3.57 $\pm$ 0.007 <sup>c</sup>	3.60 $\pm$ 0.15 <sup>c</sup>
<b>Proteína</b>	11.15 $\pm$ 0.88 <sup>a</sup>	11.70 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	12.11 $\pm$ 1.09 <sup>a</sup>	12.83 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	12.27 $\pm$ 0.42 <sup>a</sup>	11.02 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	13.01 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>
<b>Energía (Kcal/g)</b>	1.12 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	1.13 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.26 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	1.30 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.23 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	1.11 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.24 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>

Promedio  $\pm$  Desv. Est. (n=3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

Las diferencias en la composición química del pescado se observan principalmente en el contenido de lípidos. Se ha documentado anteriormente que la acumulación de grasa en las canales de pescado se compensa positivamente con el contenido de grasa de su dieta (Ding et al., 2022). De acuerdo con esto y con los resultados presentados en la Tabla 3, las dietas suplementadas con H. Cerdo presentaron un mayor contenido lipídico y, por lo tanto, la composición corporal total de los peces resultó significativamente diferente en su composición lipídica corporal. Sin embargo, (Xie et al., 1997b) concluyó que el contenido de carbohidratos está fuertemente relacionado con el depósito de lípidos en la tilapia. En este trabajo, los peces alimentados con H. Pollo aumentan su contenido lipídico a pesar del bajo contenido de grasa en la dieta, por lo que estas diferencias pueden deberse al porcentaje de carbohidratos proporcionados en la dieta. Por otro lado, (Boonanuntanasarn et al., 2018) informó que la tilapia tiene procesos anabólicos y catabólicos que le permiten regular y estabilizar la composición química de su cuerpo independientemente de la variación de macronutrientes en la dieta, al tiempo que satisface las necesidades energéticas de los peces. Esta premisa se corrobora con los datos obtenidos en esta investigación al observar las diferencias en el análisis químico de las dietas, pero que superan las 4 kcal/g necesarias para el crecimiento de los alevines de tilapia (A. F. M. El-Sayed & Teshima, 1992). Aunque se esperaba un efecto notable en el contenido de proteínas de pescado en los organismos alimentados con hidrolizados, no se observaron diferencias significativas en estos resultados

en comparación con la dieta de control. No obstante, es necesario profundizar en el metabolismo lipídico del pescado y la calidad de la carcasa proteica con la alimentación con hidrolizados proteicos en especies acuáticas.

## 5.2. Alimentos experimentales con larva de mosca soldado negra

### 5.2.1. Formulación y caracterización química de dietas

A diferencia de la primera fase de la experimentación, la segunda evaluación de dietas experimentales alternativas constó de la inclusión de larva de mosca soldado negra (LMSN) por medio de la formulación de dietas a partir de los requerimientos nutricionales del alevín de tilapia. En la Tabla 10 se resumen los resultados de la formulación y caracterización química de las dietas desarrolladas previo a su elaboración y evaluación. De acuerdo a lo obtenido, se confirmó que las dietas fueron isoproteicas (35%) e incluso se podrían considerar isocalóricas al no obtener diferencias significativas en su contenido de grasas (11%). A excepción del contenido de cenizas, el resto de los nutrientes cumplieron con los valores de referencia para alimentos para tilapia en su etapa alevín.

**Tabla 10.** Formulación de dietas experimentales con LMSN y comparación de su composición química

Ingrediente (%)	Dietas experimentales			
	D0	D50	D75	
<b>Harina de pescado</b>	35	14	11.1	
<b>Pasta de soya</b>	20	20	16.8	
<b>LMSN</b>	-	29.5	45.1	
<b>Maíz</b>	18	16.5	9	
<b>Salvado de trigo</b>	16	10	10	
<b>Aceite de soya</b>	10	9	7	
<b>Celite (marcador)</b>	1	1	1	
<b>Composición química (%)</b>				<b>REFERENCIA comercial (%)</b>
<b>Humedad</b>	6.10±0.04 <sup>a</sup>	4.02±0.36 <sup>b</sup>	5.66±0.04 <sup>a</sup>	8-12
<b>Cenizas</b>	10.64±0.007 <sup>a</sup>	12.22±0.19 <sup>b</sup>	13.31±0.02 <sup>c</sup>	< 10
<b>Grasas</b>	13.20±0.04 <sup>a</sup>	11.33±1.15 <sup>a</sup>	11.42±0.04 <sup>a</sup>	6-13

<b>Proteína</b>	35.69±0.03 <sup>a</sup>	35.30±2.55 <sup>a</sup>	35.56±0.47 <sup>a</sup>	35-40
<b>Fibra cruda</b>	2.10±0.02 <sup>a</sup>	3.06±0.07 <sup>ab</sup>	4.61±0.26 <sup>c</sup>	< 8
<b>Carbohidratos totales</b>	34.38±0.02 <sup>a</sup>	37.11±1.95 <sup>a</sup>	33.58±0.09 <sup>a</sup>	< 37
<b>Energía bruta (Kcal/g)</b>	4.66	4.57	4.45	4-5 Kcal/g

Promedio ± Desv. Est. (n=3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

La inclusión de LMSN como reemplazo de hasta el 75% de la harina de pescado en la formulación de dietas para tilapia resultó viable de acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 10. Estos coinciden con lo reportado por diferentes autores respecto al límite de inclusión de LMSN en la alimentación de tilapia (Rapatsa & Moyo, 2022). Por otro lado, el uso de LMSN permitió formular dietas que cubrieran los requerimientos proteicos de la tilapia en su etapa de alevinaje. Estos confirman lo reportado por (Kariuki et al., 2024) quienes proponen a LMSN como una fuente de proteína para desarrollar alimentos para alevines de tilapia con un contenido de 35% de proteína. Respecto al contenido de aminoácidos de las dietas, (Furuya, Cruz, & Gatlin, 2023) reportaron que dentro los requerimientos de aminoácidos para Tilapia, la arginina, lisina y fenilalanina+treonina son de los aminoácidos con mayor importancia para el desarrollo de la etapa de alevinaje en esta especie, ya que están involucrados en la síntesis de proteínas, sistema inmunológico y producción de biomasa en el pez. Como se muestra en la Tabla 11, la inclusión de LMSN en las dietas presentó un aumento en el contenido de la mayoría de los aminoácidos esenciales, y en particular de la fenilalanina y tirosina en comparación con la dieta a base de harina de pescado. Esto coincide con lo publicado por (Munguti et al., 2025), quienes consideran a la LMSN como una fuente viable de proteína y aminoácidos apta para las etapas de desarrollo más tempranas de la tilapia.

**Tabla 11.** Estimación del contenido de aminoácidos esenciales de dietas a base de LMSN

Aminoácidos esenciales (%)	Dietas experimentales			
	D0	D50	D75	LMSN
<b>Glicina</b>	2.07	1.9	2.1	2.65

<b>Alanina</b>	2.11	2.7	3.28	5.20
<b>Serina</b>	1.55	1.7	1.92	2.57
<b>Prolina</b>	1.72	2.73	3.41	5.65
<b>Valina</b>	1.83	2.44	2.96	4.67
<b>Treonina</b>	1.48	1.54	1.74	2.34
<b>Cisteína</b>	0.43	0.4	0.4	< 1.21
<b>Isoleucina</b>	1.57	1.97	2.35	3.55
<b>Leucina</b>	2.76	3.5	4.16	6.30
<b>Ácido aspártico</b>	3.49	3.49	3.83	4.69
<b>Lisina</b>	2.53	2.08	2.18	2.31
<b>Ácido glutámico</b>	5.46	5.23	5.57	6.16
<b>Metionina</b>	0.87	0.77	0.85	< 1.49
<b>Histidina</b>	0.93	1.16	1.37	2.04
<b>Fenilalanina</b>	1.57	1.98	2.34	3.45
<b>Arginina</b>	2.47	2.48	2.75	3.45
<b>Tirosina</b>	1.19	1.85	2.32	3.86
<b>Triptofano</b>	0.42	0.29	0.27	0.12

### 5.2.2. Elaboración de alimentos (extrusión)

Durante la elaboración de las dietas experimentales a base de LMSN en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos en el CICATA-IPN, se llevaron a cabo diversas evaluaciones previas de las mezclas con el fin de obtener las condiciones ideales para el desarrollo de los

alimentos. En la ilustración 3 se muestra el proceso realizado para la producción de las cuatro dietas experimentales.

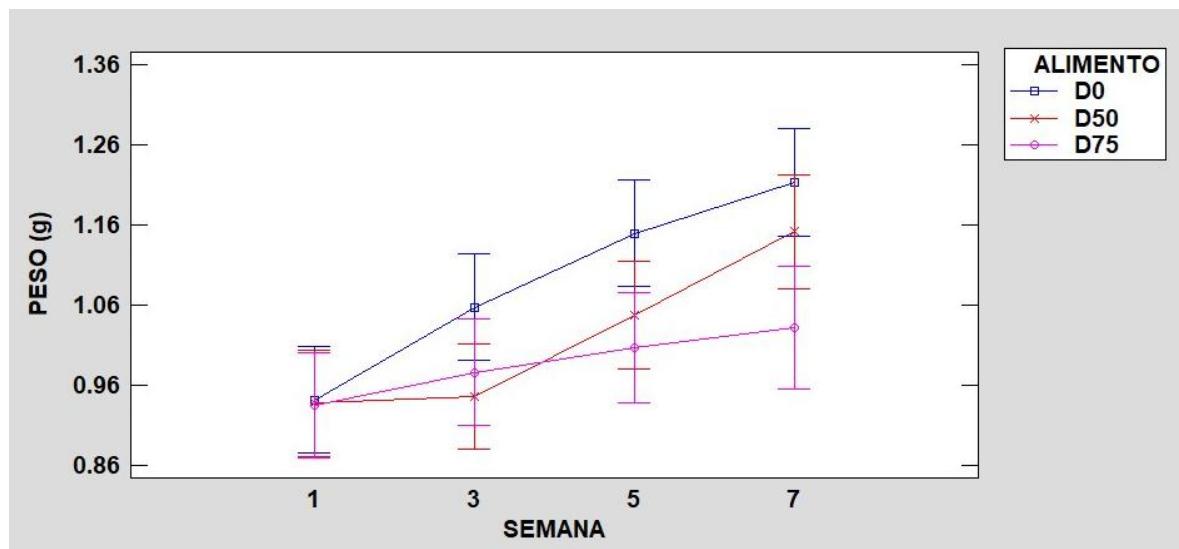


**Ilustración 3.** Fases de procesamiento de mezclas de harina para elaboración de dietas experimentales por extrusión, a) Dado utilizado para obtención de alimento con 2 mm de diámetro, b) extrusión de mezclas, c) secado de alimentos por deshidratadores eléctricos, d) alimento obtenido

Previo a la operación del extrusor se determinó la densidad de las mezclas, tamaño de partícula y porcentaje de humedad como parte del pre- tratamiento del material. Posteriormente se introdujo al extrusor a una velocidad de 30 rpm y con una temperatura de calentamiento (130°C) para asegurar el cocido de los ingredientes. Al salir del extrusor, el material fue sometido por un dado con 9 orificios de 2mm de diámetro para proporcionar condiciones de presión y así, la expansión de la mezcla al salir del equipo. Esto último para dar las propiedades de flotabilidad al alimento.

#### 5.2.3. Prueba de alimentación en cultivo de alevines de tilapia

Durante la evaluación de las dietas experimentales por medio de un cultivo de tilapia del Nilo y la toma de biometrías se lograron calcular las variables asociadas a la producción (Tabla 11). En relación con el tiempo de experimentación, se observa en la Figura 8 una mayor ganancia en peso por parte de la dieta a base de harina de pescado (D0), seguido de la dieta que contenía un 50% de la proteína de larva de mosca soldado (D50), aunque sin mostrar diferencias significativas en el peso final.



**Figura 8.** Comparación de la ganancia en peso de la ganancia en peso promedio de tilapias alimentadas con dietas experimentales con LMSN durante el tiempo experimental. Intervalo de confianza en barras (Tukey 95%).

El incremento de larva de mosca soldado en las dietas para tilapia tuvo un efecto inversamente proporcional respecto a los parámetros productivos del cultivo.

**Tabla 12.** Comparación de las variables asociadas a la producción de un cultivo de tilapia alimentado con dietas experimentales

	Diетas Experimentales		
	D0	D50	D75
<b>Peso inicial (g)</b>	$0.94 \pm 0.02$	$0.93 \pm 0.02$	$0.93 \pm 0.02$
<b>Peso final (g)</b>	$1.21 \pm 0.14$	$1.14 \pm 0.16$	$1.07 \pm 0.05$
<b>Supervivencia (%)</b>	$96 \pm 5.47^a$	$88 \pm 16.4^{ab}$	$72.5 \pm 5.0^b$
<b>Peso ganado (%)</b>	$29.32 \pm 15.5$	$21.83 \pm 14.9$	$14.33 \pm 7.57$
<b>T.E.C. (%/día)</b>	$0.63 \pm 0.28$	$0.47 \pm 0.29$	$0.33 \pm 0.16$

<b>T.C.A.</b>	$1.61 \pm 0.49$	$2.20 \pm 1.2$	$3.06 \pm 3.0$
<b>P.E.R.</b>	$1.97 \pm 0.84$	$1.64 \pm 0.84$	$1.48 \pm 0.77$
<b>F.C.</b>	$1.39 \pm 0.03$	$1.40 \pm 0.06$	$1.35 \pm 0.11$

T.E.C. = Tasa específica de crecimiento, T.C.A.= Tasa de conversión

alimentaria, P.E.R.= Razón de eficiencia proteica, F.C.= Factor de condición.

Promedio  $\pm$  Desv. Est. (n=4). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

No se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las tres dietas experimentales, a excepción de la supervivencia. En organismos acuáticos, el porcentaje de supervivencia se puede ver afectado tanto por las condiciones del ambiente acuático como por las condiciones de manejo y alimentación. Para este estudio, la supervivencia puede estar relacionada con la aceptación del alimento por el pez, por lo que las dietas con LMSN si tiene un efecto sobre la palatabilidad respecto a la dieta con harina de pescado. Estos resultados contrastan con lo publicado por (Limbu et al., 2022), ya que obtuvieron una supervivencia superior al 95% en un cultivo de semi-intensivo de tilapia.

Parámetros relacionados con la ganancia de peso de los organismos como lo son el porcentaje peso ganado y Tasa Específica de Crecimiento no se diferenciaron significativamente, no obstante, es posible decir que la dieta con reemplazo de hasta 75% de LMSN afectó negativamente el crecimiento de los alevines, ya que es la dieta que presenta menor peso e incluso, menor supervivencia. Muin et al. (2017) concluyeron que es viable reemplazar hasta en un 75% la harina de pescado en la alimentación de alevines de tilapia sin afectar su crecimiento. En contraste con este estudio, se utilizaron organismos de menos de 1 g de peso, y los resultados de ganancia en peso y T.E.C. pueden verse afectados por la adaptación de los peces al sistema de cultivo. Asimismo, otro factor a considerar es el contenido de quitina en las dietas formuladas con LMSN. Debido a la naturaleza de estos insectos, la larva de mosca contiene quitina como parte de su exoesqueleto y que en altos porcentajes en un alimento, puede afectar la asimilación de éste, afectando por tanto el crecimiento de los peces (Perez-Velazquez et al., 2024). Si bien, se ha reportado un valor óptimo de fibra en la alimentación menor al 9% para evitar afectar el crecimiento de peces, se ha evaluado que la inclusión de LMSN sin un previo tratamiento de extracción de quitina, afecta la digestibilidad de nutrientes en especies como la tilapia (Eggink, Pedersen, Lund, & Dalsgaard, 2022; Lanna

et al., 2004). A pesar de ello y de acuerdo a los resultados reportados en este estudio, la dieta con reemplazo del 50% de la harina de pescado no indica un efecto significativo en el crecimiento en comparación con la dieta control D0.

La tasa de conversión alimentaria (T.C.A.) calcula la cantidad de alimento que necesita un organismo para crecer, específicamente estima cuánto alimento requiere el pez para aumentar un gramo de peso. A partir de esto, entre más bajo sea el valor calculado, más eficiente es el alimento para consumo del pez. Los resultados obtenidos para la dieta D50 en este estudio resultaron similares a los reportados por (Tippayadara et al., 2021), quienes obtuvieron T.C.A. entre 2.1 y 2.2 al reemplazar hasta el 100% de la harina de pescado en dietas para tilapia. No obstante, aunque la dieta con harina de pescado tuvo un valor menor en comparación con las dietas con LMSN, no se encontraron diferencias significativas.

Los valores obtenidos para la P.E.R, la cual indica la retención de proteína por parte del organismo al consumir el alimento, fueron superiores para la dieta D0 y D50, sin presentar diferencias significativas. Este parámetro está asociado a la calidad de proteína y el balance de aminoácidos proporcionados en el alimento para los organismos. De acuerdo con (Munguti et al., 2025), la harina de LMSN puede cubrir los requerimientos de aminoácidos esenciales de la tilapia, principalmente de histidina, lisina, leucina y valina; considerándose una fuente de proteína viable para su alimentación y el reemplazo de la harina de pescado. Es por esto que en los resultados de la Tabla 12, se observa que las dietas experimentales con LMSN logran un buen soporte del crecimiento por medio del aprovechamiento de proteína, incluso similar a lo generado por la dieta con harina de pescado.

Finalmente, el factor de condición, también conocido como factor de Fulton, es un valor asociado al estado de salud de los organismos, relacionado en este caso, se calculó para evaluar la condición de los alevines por el cambio de fuente de proteína en su alimentación. De igual manera, no se obtuvieron diferencias entre las diferentes dietas, incluso se calcularon valores muy similares entre los tratamientos. Cuando el valor del factor es superior a 1, se considera que los peces se encuentran en buen estado de salud y por lo tanto, con un buen crecimiento (Félix-Cuencas et al., 2021). Esto indica que, a pesar de las condiciones de experimentación y cambios de alimentación, la harina de LMSN es viable para ser incluida en la dieta de alevines de tilapia sin afectar su condición de homeostasis en el organismo.

Autores como Limbu et al. (2022) y Fayed et al. (2024) han logrado obtener factores de condición de hasta 1.5 al utilizar LMSN como fuente de proteína en alevines de tilapia.

#### **5.2.4. Monitoreo calidad de agua**

La cantidad y calidad de proteína en un alimento está directamente ligado con la producción de diferentes formas de nitrógeno en el agua de un cultivo de peces. Los resultados de la calidad de agua presentados en la Tabla 13 mostraron diferencias significativas en el contenido de amonio, siendo la dieta con harina de pescado la de mayor producción de N-amoniacial. Debido a que las dietas evaluadas en este estudio fueron isoproteicas, la diferencia en la producción de N-amoniacial puede estar relacionada con la digestibilidad de las dietas, indicando entonces un mejor aprovechamiento de las dietas D0 y D50 por los alevines de tilapia. (Hasniyati Muin & Taufek, 2022) reportaron un mayor porcentaje de digestibilidad de proteína para una dieta con LMSN en comparación con una dieta convencional con harina de pescado en la alimentación de red hybrid tilapia. En particular, el nitrógeno amoniacial es producido por los peces como resultado del metabolismo de aminoácidos, ya que, después de ser aprovechados para síntesis de otras moléculas y como fuente de energía, es excretado al medio (Mes et al., 2023b). Además, una alta concentración de amonio en el agua resulta tóxico para los peces, representando un riesgo para el desarrollo del cultivo y sobre todo en sistemas acuícolas de recirculación. Un aspecto importante en la formulación de alimentos acuícolas es la inclusión de ingredientes que no afecten la calidad del agua (Limbu et al., 2022); a partir de esto, las dietas experimentales con LMSN disminuyeron la producción de N-amoniacial en el sistema de cultivo durante el tiempo de experimentación, aportando a la mejora del ambiente acuático de los organismos y por consecuencia a la reducción de la contaminación del agua.

**Tabla 13.** Monitoreo de la calidad de agua del cultivo de alevines alimentados con LMSN

	Diетas experimentales		
	D0	D50	D75
<b>N-Ammoniacal</b>	0.46 ± 0.32 <sup>a</sup>	0.23 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.33 ± 0.13 <sup>ab</sup>
<b>Nitritos</b>	0.72 ± 0.58	0.40 ± 0.30	0.63 ± 0.51
<b>Nitratos</b>	3.52 ± 1.69	2.89 ± 0.64	3.35 ± 0.73

<b>D.O.</b>	$6.43 \pm 0.63$	$6.64 \pm 0.51$	$6.40 \pm 0.52$
<b>pH</b>	$8.73 \pm 0.09$	$8.75 \pm 0.10$	$8.8 \pm 0.24$

Promedio  $\pm$  Desv. Est. (n=3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

Por otro lado, los nitritos y los nitratos son generados debido a la transformación del amonio por medio de bacterias presentes en el sistema; una alta concentración de estos tiende a afectar funciones fisiológicas de los peces como la respiración y el sistema cardiovascular (Zhang et al., 2023). La inclusión de LMSN en la alimentación de alevines de tilapia no afectó significativamente la concentración de nitratos y nitritos en el sistema acuícola en comparación con la dieta D0. No obstante, se puede observar en los resultados una disminución de estos compuestos en las dietas D50 y D75. Esto último se ve relacionado de igual forma con la disminución en la producción de N-amoniacial por parte de los organismos.

Los sistemas acuícolas intensivos ofrecen ventajas significativas particularmente en el uso eficiente del agua, aunque en ocasiones con un mayor requerimiento de energía debido a su tecnificación y mantenimiento (Badiola et al., 2018). Los resultados presentados en este experimento respecto a la reducción de productos de nitrógeno por la alimentación con LMSN, aportan a la optimización de estos sistemas intensivos, ya que además de disminuir más aún su impacto a la calidad de agua, esto representaría una menor frecuencia de mantenimiento de los sistemas, reduciendo así la demanda energética de operación y contribuyendo a la sustentabilidad de la acuicultura.

### 5.2.5. Evaluación bioenergética

La determinación del consumo de oxígeno y excreción de amonio permitieron generar los valores R y U necesarios para la estimación del flujo de energía de los alevines de tilapia al modificar su alimentación con la inclusión de harinas de insectos. De acuerdo a los resultados de la Tabla 14, la dieta D0, a base de harina de pescado, muestra un mayor consumo de oxígeno de los peces, esto indica un aumento en el metabolismo de los organismos que está asociado con el estrés del pez. Las dietas con LMSN obtuvieron diferencias significativas al observar una reducción en el consumo de oxígeno.

**Tabla 14.** Variables asociadas al metabolismo aerobio de tilapia alimentada con LMSN

	Dietas experimentales		
	D0	D50	D75
<b>Consumo O<sub>2</sub></b> (mg/L/g pez)	2.55 ± 0.07	1.80 ± 1.78	1.81 ± 1.77
<b>Excreción NH<sub>4</sub></b> (mg/L/g pez)	0.12 ± 0.03	0.08 ± 0.03	0.1 ± 0.09
<b>Razón O:N</b>	21.58 ± 9.39	26.90 ± 19.8	16.31 ± 11.0

Promedio ± Desv. Est. (n=3). Superíndice indican diferencia significativa (p<0.05)

Los cambios en las condiciones ambientales de desarrollo de los peces, como la alimentación, provocan un incremento de la actividad metabólica con el fin de conservar su energía de mantenimiento, pero sacrificando la producción de biomasa (Jobling, 2017). Esta energía de mantenimiento puede estimarse midiendo el metabolismo basal, que representa el estado de homeostasis del organismo. Según esta información y los resultados obtenidos en este estudio, las dietas con BSFL proporcionaron la energía necesaria para abastecer el metabolismo basal de la tilapia, observándose un menor consumo de oxígeno en comparación con la dieta de control (Tabla 14). Esta aportación energética de las dietas experimentales permite entonces que los peces dispongan de energía suficiente para su crecimiento, resultados que coinciden con los presentados para el rendimiento del crecimiento. Por otro lado, la cuantificación de la excreción de amonio está relacionada con el metabolismo del nitrógeno y se utiliza para estimar la utilización de nutrientes (principalmente proteínas) por parte del organismo (Engin et al., 2013). Los resultados obtenidos no presentaron diferencias significativas en comparación con la dieta de control, pero se observó una disminución en la excreción de amonio de los peces alimentados con la dieta D50. La disminución en la excreción de amonio por las dietas experimentales puede estar relacionada con la calidad de sus proteínas. Los valores calculados a partir de la relación de ambas variables (relación O:N) permiten obtener datos que, según el rango en el que se encuentren, estiman el tipo de sustrato que el pez está metabolizando: los valores inferiores a 10 se refieren al metabolismo de las proteínas; los resultados superiores a 10 indican el metabolismo de los lípidos y los carbohidratos (Cao & Wang, 2014; Mayzaud & Conover, 1988). Los resultados indican que,

para todas las dietas experimentales evaluadas en este estudio, la energía se obtuvo del catabolismo de lípidos y carbohidratos sin diferencias significativas.

Los elementos asociados el balance bioenergético, tanto los relacionados con el consumo de alimento y excreción de heces, como los determinados por el análisis del metabolismo aerobio de los peces son presentados en la Tabla 15.

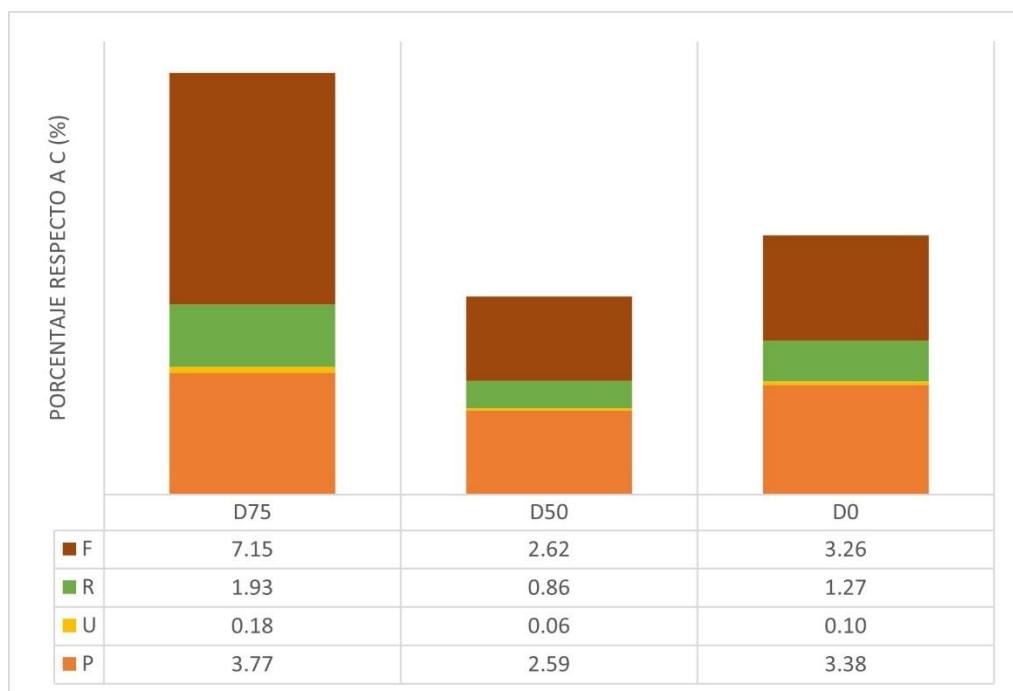
**Tabla 15.** Variables involucradas en el balance bioenergético de tilapia alimentada con dietas experimentales

(J/g/día)	Diетas Experimentales		
	D0	D50	D75
P	95.56	75.28	53.26
R	35.85 <sup>a</sup>	25.3 <sup>b</sup>	25.45
U	2.86 <sup>a</sup>	1.91 <sup>b</sup>	2.38
F	90.79	78.48	95.25
C	2883.02	2981.58	1358.09
Tasa ingestión (g/g pez)	0.20	0.20	0.17
Tasa producción heces (g/g pez)	0.0052	0.0045	0.0032
Energía Digerible (ED)	2792.23	2903.1	1838.62
Energía Metabolizable (EM)	2789.36	2901.19	1836.24
Eficiencia energética (%)	96.63	97.32	94.92

Valores promedio. (n=4). Superíndice indican diferencias significativas (p<0.05)

Los resultados bioenergéticos obtenidos con las dietas a base de LMSN fueron significativamente inferiores comparados con las dietas suplementadas con hidrolizados proteicos. Esta diferencia notable esta asociada a las temperaturas alcanzados por el sistema de cultivo ya que, la distribución energética se ve severamente afectada por la temperatura y estación del año en la que se lleva a cabo el cultivo (Madenjian, 2011; Xie et al., 2011). A diferencia del balance previo, los peces alimentados con LMSN presentaron una mayor proporción de perdida energética por heces (F), principalmente la dieta D75. Estos resultados pueden estar asociados a la asimilación del alimento por parte del organismo. Por otro lado, es posible que las heces hayan tenido una mayor solubilidad en el medio y que se hayan

podido confundir con el alimento restante, ya que se puede observar un aumento en la energía perdida en heces para todas las dietas en comparación con la prueba anterior. Respecto a la eficiencia energética de estas dietas, la dieta a base de harina de pescado obtuvo un mayor porcentaje en comparación con la dieta D75, esto puede estar asociado a la poca ganancia en peso obtenido por la dieta con 75% de LMSN y a la gran pérdida de energía observada en la Figura 9 asociada a F, U y R. Esto indica que un reemplazo mayor al 50% de LMSN afecta la distribución de energía asociado a la falta de nutrientes esenciales por la dieta y al mal uso de la fuente proteica por parte del pez. La dieta D50 tuvo un comportamiento similar energéticamente en comparación con la dieta D0, incluso se observó un menor gasto energético en las variables metabólicas y un mayor porcentaje de asimilación.



**Figura 9.** Comparación de la proporción energética en porcentaje de las variables asociadas a la bioenergética de alevines de tilapia con base en la energía consumida (C). Variables energéticas asociadas a heces (F), metabolismo (R), excreción nitrógeno (U) y crecimiento (P). N=4.

### 5.2.6. Composición química de alevines

La distribución de nutrientes en el pez puede ser analizada por medio de la caracterización físico química de la carcasa del pez. Los resultados presentados en la Tabla 16 muestran que

la dieta D75 generó peces con una menor cantidad de cenizas, proteína y grasas en comparación con los organismos alimentados con las dietas D0 y D50.

**Tabla 16.** Composición química alevines alimentados con dieta a base de larva de mosca soldado negra y harina de pescado

Composición química (g/100g)	Dietas experimentales		
	D0	D50	D75
<b>Humedad</b>	77.77±0.78	79.03±1.52	82.12±3.70
<b>Cenizas</b>	4.13±0.07	4.17±0.07	3.88±1.06
<b>Proteína</b>	10.07±0.51	9.82±0.67	8.62±1.63
<b>Grasas totales</b>	3.82±0.17	3.02±0.09	1.97±0.51
<b>Calorías (cal/g)</b>	1083.07±32.27	999.78±32.05	730.92±208.20

Valores promedio ± desviación estándar. (n=2)

De acuerdo con (Rukshana Sumi et al., 2014) la composición química de los alevines de tilapia se puede encontrar generalmente entre 72-84% de humedad, 10-17% de proteína, de 1 a 4% de grasas y 2-5% de cenizas. Si bien, todos los resultados presentados en la Tabla 16 se encuentran dentro del rango de composición sugerida, el remplazo de harina de pescado con hasta 75% de LMSN en la alimentación de alevines de tilapia generó un menor contenido de los macronutrientes. El contenido de nutrientes del pez esta relacionado con la calidad nutrimental del alimento y debido a que las dietas experimentales fueron isoproteicas, la disminución en el contenido de proteína de los peces en la dieta D75 puede estar ligada a la calidad y cantidad de aminoácidos de la dieta. Las dietas D0 y D50 presentaron composiciones similares en los alevines, representando una mejor asimilación de éstas formulaciones por parte de los organismos. Estos resultados contrastan con lo reportado por (Aisyah et al., 2022), quienes obtuvieron un aumento en el contenido de proteína de alevines de tilapia alimentados con LMSN, no obstante, a diferencia de este estudio, se utilizó un alimento comercial como base en la cuál se adicionó 30% en peso de harina de LMSN.

## VI. CONCLUSIONES

Los hidrolizados proteicos derivados de sub-productos de origen animal, así como la larva de mosca soldado negra son alternativas viables para su uso en la alimentación de alevines de tilapia, ya que su inclusión en la formulación de dietas permite alcanzar los requerimientos nutrimentales de este organismo de interés acuícola. Así mismo, tanto las dietas suplementadas con hidrolizados proteicos como la inclusión de larva de mosca cumplieron con la calidad físico-química requerida para el desarrollo de alimentos para alevín de tilapia.

La inclusión de hidrolizados en la alimentación de tilapia incrementa el crecimiento del pez y no afectan significativamente la actividad metabólica de la tilapia. Asimismo, de acuerdo a la eficiencia energética obtenida, se considera a los hidrolizados proteicos derivados de pescado y cerdo como una alternativa con mayor asimilación con respecto a una dieta a base de harina de pescado como fuente proteica, incluso en bajos porcentajes como 1.5 y 3%.

Por otro lado, se recomienda la sustitución de harina de pescado con hasta 50% de larva de mosca para mantener el desarrollo de los peces, aunque no con la misma eficiencia que con los hidrolizados proteicos. A pesar que ser un insumo reportado con gran potencial para la alimentación de organismos acuáticos, de acuerdo a los resultados obtenidos se propone el tratamiento de la harina de LMSN para hacer más eficiente la asimilación de sus macronutrientes, considerando una opción viable la hidrolisis proteica de ésta, ya que se ha comprobado en este trabajo como aumenta la viabilidad de los alimentos al utilizar fuentes de este tipo. Otra perspectiva derivada a los resultados presentados es la implementación conjunta de hidrolizados proteicos con harina de LMSN, esto como una formulación para tilapia que incluya una fuente proteica de calidad como macronutriente (la harina de larva) y que al mismo tiempo provea de efectos funcionales por parte de los hidrolizados haciendo una función de aditivos en la alimentación acuícola. A su vez, será necesario evaluar su efecto sobre el desarrollo de un cultivo de tilapia (crecimiento y asimilación de nutrientes), así como el sistema inmunológico del organismo.

## VII. REFERENCIAS

- Abdel-Tawwab, M., Khalil, R. H., Metwally, A. A., Shakweer, M. S., Khallaf, M. A., & Abdel-Latif, H. M. R. (2020). Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens L.*) larvae meal on growth performance, organs-somatic indices, body composition, and hematobiochemical variables of European sea bass, *Dicentrarchus labrax*. *Aquaculture*, 522(February), 735136. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735136>
- Aisyah, H. N., Athirah, Z. A. R., Hanani, W. R., Arshad, S. S., Hassim, H. A., Nazarudin, M. F., & Ina-Salwany, M. Y. (2022). The effect of feeding black soldier fly larvae on growth performance, protein, and fat content of red hybrid tilapia (*Oreochromis* spp.). *Veterinary World*, 2453–2457. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.2453-2457>
- Atwood, H. L., Fontenot, Q. C., Tomasso, J. R., & Isely, J. J. (2001). Toxicity of Nitrite to Nile Tilapia: Effect of Fish Size and Environmental Chloride. *North American Journal of Aquaculture*, 63(1), 49–51. [https://doi.org/10.1577/1548-8454\(2001\)063<0049:tontnt>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8454(2001)063<0049:tontnt>2.0.co;2)
- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens L.*) and its suitability as animal feed – a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Belghit, I., Liland, N. S., Waagbø, R., Biancarosa, I., Pelusio, N., Li, Y., Krogdahl, Å., & Lock, E. J. (2018). Potential of insect-based diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 491(March), 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.03.016>
- Boonanuntasarn, S., Kumkhong, S., Yoohat, K., Plagnes-Juan, E., Burel, C., Marandel, L., & Panserat, S. (2018). Molecular responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to different levels of dietary carbohydrates. *Aquaculture*, 482(June 2017), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.09.032>
- Cao, F., & Wang, H. (2014). Effects of salinity and body mass on oxygen consumption and ammonia excretion of mudskipper *Boleophthalmus pectinirostris*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(1), 92–98. <https://doi.org/10.1007/s00343-015-4107-9>

Chalamaiah, M., Dinesh kumar, B., Hemalatha, R., & Jyothirmayi, T. (2012). Fish protein hydrolysates: Proximate composition, amino acid composition, antioxidant activities and applications: A review. *Food Chemistry*, 135(4), 3020–3038. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.100>

Cho, C. Y. y D. P. B. (1996). Bioenergética en la formulación de dietas y estándares de alimentación para la acuacultura del salmón: principios, métodos y aplicaciones. *Nutrition Research*, 31–98.

Davies, M. S., & Hatcher, A. M. (1998). The energy budget: A useful tool. *Annales Zoologici Fennici*, 35(4), 231–240.

Deslauriers, D., Chipps, S. R., Breck, J. E., & Rice, J. A. (2017). *An R-Based Modeling Application*. 2415. <https://doi.org/10.1080/03632415.2017.1377558>

Ding, L., Chen, W., Fu, H., Xiao, J., Fu, Y., & Ma, J. (2022). Estimation of the Optimum Dietary Protein to Lipid Ratio in Juvenile Pengze Crucian Carp (*Carassius auratus* Var. Pengze). *Aquaculture Nutrition*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/2485134>

Duong, D. N., Stone, D. A. J., Qin, J. G., Bansemer, M. S., & Harris, J. O. (2021). Energy budgets for Greenlip Abalone (*Haliotis laevigata* Donovan) fed graded dietary crude protein levels at seasonal water temperatures. *Aquaculture*, 536(October 2020), 736499. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736499>

Egerton, S., Wan, A., Murphy, K., Collins, F., Ahern, G., Sugrue, I., Busca, K., Egan, F., Muller, N., Whooley, J., McGinnity, P., Culloty, S., Ross, R. P., & Stanton, C. (2020). Replacing fishmeal with plant protein in Atlantic salmon (*Salmo salar*) diets by supplementation with fish protein hydrolysate. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60325-7>

El-Sayed, A. F. M., & Teshima, S. ichi. (1992). Protein and energy requirements of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fry. *Aquaculture*, 103(1), 55–63. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(92\)90278-S](https://doi.org/10.1016/0044-8486(92)90278-S)

El-Sayed, A.-F. M. (2020). Nutrition and feeding. In *Tilapia Culture* (pp. 135–172). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816509-6.00007-0>

- Encarnaçao, P. (2016). Functional feed additives in aquaculture feeds. *Aquafeed Formulation*, 217–237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800873-7.00005-1>
- Engin, K., Tufan Erolđgan, O., Özşahinoğlu, I., Asuman Yılmaz, H., & Mumođullarında, P. (2013). Diurnal ammonia and urea excretion rates in European sea bass, *Dicentrarchus labrax* fed diets containing mixtures of canola and cotton seed oil at two different ambient temperature. *Journal of Thermal Biology*, 38(8), 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2013.10.004>
- Estess, E. E., Klinger, D. H., Coffey, D. M., Gleiss, A. C., Rowbotham, I., Seitz, A. C., Rodriguez, L., Norton, A., Block, B., & Farwell, C. (2017). Bioenergetics of captive yellowfin tuna ( *Thunnus albacares* ). *Aquaculture*, 468, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.053>
- Fantatto, R. R., Mota, J., Ligeiro, C., Vieira, I., Guilgur, L. G., Santos, M., & Murta, D. (2024). Exploring sustainable alternatives in aquaculture feeding: The role of insects. *Aquaculture Reports*, 37, 102228. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102228>
- FAO. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. In *Nature and Resources* (Vol. 35, Issue 3). FAO. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Fawole, F. J., Adeoye, A. A., Tiamiyu, L. O., Ajala, K. I., Obadara, S. O., & Ganiyu, I. O. (2020). Substituting fishmeal with *Hermetia illucens* in the diets of African catfish (*Clarias gariepinus*): Effects on growth, nutrient utilization, haemato-physiological response, and oxidative stress biomarker. *Aquaculture*, 518(December 2019), 734849. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734849>
- Gasco, L., Gai, F., Maricchiolo, G., Genovese, L., Ragonese, S., Bottari, T., & Caruso, G. (2018). *Feeds for the Aquaculture Sector*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77941-6>
- Gisbert, E., Skalli, A., Fernández, I., Kotzamanis, Y., Zambonino-Infante, J. L., & Fabregat, R. (2012). Protein hydrolysates from yeast and pig blood as alternative raw materials in microdiets for gilthead sea bream (*Sparus aurata*) larvae. *Aquaculture*, 338–341, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.01.007>

Gomes, J. R., da Silva Cardoso, A. J., Hisano, H., de Freitas, R. M. P., Martins, K. V. B., Azevedo, F. S., Freitas, M. B., França Ferreira, P. de M., Salaro, A. L., & Zuanon, J. A. S. (2023). Redox status of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758), fed diets supplemented with poultry liver protein hydrolysate as feed additive. *Animal Feed Science and Technology*, 303, 115711. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115711>

Habinshuti, I., Nsengumuremyi, D., Muhoza, B., Ebenezer, F., Yinka Aregbe, A., & Antoine Ndisanze, M. (2023). Recent and novel processing technologies coupled with enzymatic hydrolysis to enhance the production of antioxidant peptides from food proteins: A review. *Food Chemistry*, 423, 136313. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136313>

Hender, A., Siddik, M. A. B., Howieson, J., & Fotedar, R. (2021). Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* as an Alternative to Fishmeal Protein and Fish Oil: Impact on Growth, Immune Response, Mucosal Barrier Status, and Flesh Quality of Juvenile Barramundi, *Lates calcarifer* (Bloch, 1790). In *Biology* (Vol. 10, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/biology10060505>

Herault, M., Gunathilaka, B. E., Fournier, V., Le Bris, H., Lee, K.-J., & Sadoul, B. (2023). Aquatic product hydrolysates increase rearing performance in red seabream (*Pagrus major*), fed a low fish meal diet, in both controlled and stressed conditions: From growth to stress responses. *Aquaculture*, 576, 739830. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739830>

Hou, Y., Wu, Z., Dai, Z., Wang, G., & Wu, G. (2017a). Protein hydrolysates in animal nutrition: Industrial production, bioactive peptides, and functional significance. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0153-9>

Hou, Y., Wu, Z., Dai, Z., Wang, G., & Wu, G. (2017b). Protein hydrolysates in animal nutrition: Industrial production, bioactive peptides, and functional significance. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0153-9>

- Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., Praeger, C., Vucko, M. J., Zeng, C., Zenger, K., & Strugnell, J. M. (2019). The Future of Aquatic Protein: Implications for Protein Sources in Aquaculture Diets. *One Earth*, 1(3), 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>
- Jobling, M. (2017). Bioenergetics in Aquaculture Settings. *Reference Module in Life Sciences, September 2015*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809633-8.03202-7>
- Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., & Tracy, B. P. (2020). Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. *Current Opinion in Biotechnology*, 61(Table 1), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.12.026>
- Khosravi, S., Bui, H. T. D., Rahimnejad, S., Herault, M., Fournier, V., Kim, S. S., Jeong, J. B., & Lee, K. J. (2015). Dietary supplementation of marine protein hydrolysates in fish-meal based diets for red sea bream (*Pagrus major*) and olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture*, 435, 371–376. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2014.10.019>
- Lall, S. P., & Dumas, A. (2015). Nutritional requirements of cultured fish. In *Feed and Feeding Practices in Aquaculture* (Issue iii). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100506-4.00003-9>
- Laurent, S., Laville, F., Jury, V., & Fayolle, F. (2024). Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of insect-based fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, 318(2), 116142. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.116142>
- Lupatsch, I. (2014). *Nutritional Bioenergetics for Optimal Feeding*. June.
- Macusi, E. D., Cayacay, M. A., Borazon, E. Q., Sales, A. C., Habib, A., Fadli, N., & Santos, M. D. (2023). Protein Fishmeal Replacement in Aquaculture: A Systematic Review and Implications on Growth and Adoption Viability. *Sustainability*, 15(16), 12500. <https://doi.org/10.3390/su151612500>

- Madenjian, C. P. (2011). ENERGETIC MODELS | Bioenergetics in Ecosystems. In *Encyclopedia of Fish Physiology: From Genome to Environment: Volume 1-3* (Vols. 1–3, pp. 1675–1680). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374553-8.00153-2>
- Makkar, H. P. S., Tran, G., Heuzé, V., & Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>
- Martínez-Alvarez, O., Chamorro, S., & Brenes, A. (2015). Protein hydrolysates from animal processing by-products as a source of bioactive molecules with interest in animal feeding: A review. *Food Research International*, 73(1069), 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.005>
- Martínez-Porcha, M., Martínez-Córdova, L. R., & Ramos-Enríquez, R. (2009). *Dinámica del crecimiento de peces y crustáceos*. <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet>  
<http://revista.veterinaria.org/Vol.10,Nº10,Octubre/2009->  
<http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n101009.html>
- Mayzaud, P., & Conover, R. (1988). O:N atomic ratio as a tool to describe zooplankton metabolism. *Marine Ecology Progress Series*, 45, 289–302. <https://doi.org/10.3354/meps045289>
- Miron, L., Montevecchi, G., Bruggeman, G., Macavei, L. I., Maistrello, L., Antonelli, A., & Thomas, M. (2023). Functional properties and essential amino acid composition of proteins extracted from black soldier fly larvae reared on canteen leftovers. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 87, 103407. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103407>
- Monsees, H., Klatt, L., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 48(7), 3482–3492. <https://doi.org/10.1111/are.13174>
- National Research Council. (2011). Nutrient Requirements of Fish and Shrimp. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13039>

- Nelson, J. A. (2016). Oxygen consumption rate v. rate of energy utilization of fishes: A comparison and brief history of the two measurements. *Journal of Fish Biology*, 88(1), 10–25. <https://doi.org/10.1111/jfb.12824>
- Peres, H., Freitas, J. M. A., Carvalho, P. L. P., Furuya, W. M., Satori, M. M. P., Oliva-Teles, A., Pezzato, L. E., & Barros, M. M. (2022). Growth performance and metabolic responses of Nile tilapia fed diets with different protein to energy ratios. *Aquaculture*, 547(September 2021), 737493. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737493>
- Phan, L. T. T., Kals, J., Masagounder, K., Mas-Muñoz, J., & Schrama, J. W. (2022). Energy utilisation efficiencies of digestible protein, fat and carbohydrates for African catfish (*Clarias gariepinus*). *Aquaculture Reports*, 23(September 2021). <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101051>
- Rahman, Md. H., Alam, M. A., Flura, Moniruzzaman, Md., Sultana, S., Islam, Md. R., & Talukdar, A. (2023). Alternative protein sources as a replacement of fish meal in the diet of *Oreochromis niloticus*: A review. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 8(3), 442–451. <https://doi.org/10.26832/24566632.2023.0803024>
- Rukshana Sumi, K., Sharker, R., Mokhlasur Rahman, M., & Rushna Alam, M. (2014). Effect of different live feeds on the growth performance and flesh quality of nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. <http://www.ijlbpr.com/currentissue.php>
- Sandbakken, I. S., Five, K. K., Bardal, T., Knapp, J. L., & Olsen, R. E. (2023). Salmon hydrolysate as a protein source for Atlantic salmon; prion content and effects on growth, digestibility and gut health. *Aquaculture*, 576(July), 739863. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739863>
- Schrama, J. W., Haidar, M. N., Geurden, I., Heinsbroek, L. T. N., & Kaushik, S. J. (2018). Energy efficiency of digestible protein, fat and carbohydrate utilisation for growth in rainbow trout and Nile tilapia. *British Journal of Nutrition*, 119(7), 782–791. <https://doi.org/10.1017/S0007114518000259>
- Serra, V., Pastorelli, G., Tedesco, D. E. A., Turin, L., & Guerrini, A. (2024). Alternative protein sources in aquafeed: Current scenario and future perspectives. *Veterinary and Animal Science*, 25, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100381>

- Siddik, M. A. B., Howieson, J., Fotedar, R., & Partridge, G. J. (2021). Enzymatic fish protein hydrolysates in finfish aquaculture: a review. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 406–430. <https://doi.org/10.1111/raq.12481>
- Soares, M., Rezende, P. C., Corrêa, N. M., Rocha, J. S., Martins, M. A., Andrade, T. C., Fracalossi, D. M., & do Nascimento Vieira, F. (2020). Protein hydrolysates from poultry by-product and swine liver as an alternative dietary protein source for the Pacific white shrimp. *Aquaculture Reports*, 17(July 2019), 100344. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100344>
- Sørensen, M. (2012). A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy fish feed as measured by prevailing methods. *Aquaculture Nutrition*, 18(3), 233–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2011.00924.x>
- Suratip, N., Charoenwattanasak, S., Klahan, R., Herault, M., & Yuangsoi, B. (2023). An investigation into the effects of using protein hydrolysate in low fish meal diets on growth performance, feed utilization and health status of snakehead fish (*Channa striata*) fingerling. *Aquaculture Reports*, 30(May), 101623. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101623>
- Swanepoel, J. C., & Goosen, N. J. (2018). Evaluation of fish protein hydrolysates in juvenile African catfish (*Clarias gariepinus*) diets. *Aquaculture*, 496, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.084>
- Trung, T. S., Tran, H. V., Le, M.-H., Ky, P. X., Brown, P. B., & Ngo, M. Van. (2022). Growth performance, haematological parameters and proximate composition of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* fed varying dietary levels of protein hydrolysate from heads of *Penaeus monodon* shrimp processing industry. *Regional Studies in Marine Science*, 55, 102643. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102643>
- Turchini, G. M., & Hardy, R. W. (2024). Research in Aquaculture Nutrition: What Makes an Experimental Feeding Trial Successful? *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2413672>

- Villamil, O., Váquiro, H., & Solanilla, J. F. (2017). Fish viscera protein hydrolysates: Production, potential applications and functional and bioactive properties. *Food Chemistry*, 224, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.057>
- Villanueva-Gutiérrez, E., Rodriguez-Armenta, C., González-Félix, M. L., & Perez-Velazquez, M. (2022). Incorporating hydrolyzed soy protein or black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal into feeds for Totoaba macdonaldi. *Aquaculture*, 554. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738152>
- Watanabe, M. O. & T. (1996). Dietary Energy Budgets in Carp. *Fisheries Science*, 62(5), 745–753.
- Wu, D., Zhang, Y., Li, J., Fan, Z., Xu, Q., & Wang, L. (2022). Assessment of chicken intestinal hydrolysates as a new protein source to replace fishmeal on the growth performance, antioxidant capacity and intestinal health of common carp (*Cyprinus carpio*). *Fish & Shellfish Immunology*, 125, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.05.011>
- Xie, D., Yang, L., Yu, R., Chen, F., Lu, R., Qin, C., & Nie, G. (2017). Effects of dietary carbohydrate and lipid levels on growth and hepatic lipid deposition of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 479(June), 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.07.013>
- Xie, S., Cui, Y., Yang, Y., & Liu, J. (1997) Energy budget of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in relation to ration size. *Aquaculture*, 154(1), 57–68. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00039-2)
- Xie, S., Zheng, K., Chen, J., Zhang, Z., Zhu, X., & Yang, Y. (2011). Effect of water temperature on energy budget of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture Nutrition*, 17(3), e683–e690. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00827.x>
- Xue, S., Ding, J., Li, J., Jiang, Z., Fang, J., Zhao, F., & Mao, Y. (2021). Effects of live, artificial and mixed feeds on the growth and energy budget of *Penaeus vannamei*. *Aquaculture Reports*, 19, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100634>

Yi, Y. (1988). A bioenergetics growth model for Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a cage-cum-pond integrated culture system. *Fifteenth Annual Technical Report, Thailand Special Topics*, 113–128.

Zheng, K., Liang, M., Yao, H., Wang, J., & Chang, Q. (2012). Effect of dietary fish protein hydrolysate on growth, feed utilization and IGF-I levels of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture Nutrition*, 18(3), 297–303. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2011.00896.x>

Zlaugotne, B., Pubule, J., & Blumberga, D. (2022). Advantages and disadvantages of using more sustainable ingredients in fish feed. *Helijon*, 8(9), e10527. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10527>

Zou, Y., Shahidi, F., Shi, H., Wang, J., Huang, Y., Xu, W., & Wang, D. (2021). Values-added utilization of protein and hydrolysates from animal processing by-product livers: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 110(February), 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.033>