



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN  
EN UN CULTIVO DE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*)  
UTILIZANDO UN ALIMENTO SUPLEMENTADO CON  
MICROALGAS”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

PRESENTA

**MÓNICA VANESSA OVIEDO OLVERA**

DIRIGIDA POR

**DR. JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO**

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2018.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN  
EN UN CULTIVO DE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*)  
UTILIZANDO UN ALIMENTO SUPLEMENTADO CON  
MICROALGAS”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

PRESENTA

**MÓNICA VANESSA OVIEDO OLVERA**

DIRIGIDA POR

**DR. JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO**

**SINODALES**

**Dr. JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO**

**DIRECTOR**

**Dra. ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ**

**SINODAL**

**Dr. SERGIO DE JESÚS ROMERO GÓMEZ**

**SINODAL**

**Dr. VÍCTOR PÉREZ MORENO**

**SINODAL**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente agradezco a Dios por darme la oportunidad de llevar mis estudios hasta este nivel, por darme las capacidades para lograrlo y por bendecirme con la compañía de todas las personas que estuvieron presentes en este camino.

Gracias a mi familia por creer firmemente en mí y por impulsarme a ser cada vez mejor por mí y para los demás. Con su amor incondicional lograron llevarme más allá de mis sueños y capacidades; mamá, papá, hermana, lo logramos!

De igual forma quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Fernando García, por haberme permitido formar parte de su gran equipo de trabajo, por apoyarme en la realización de este trabajo y sobre todo por compartirme sus valiosos conocimientos para seguir creciendo en este camino de ciencia.

Al Laboratorio de Bioingeniería del Campus Amazcala y a todos sus integrantes, en especial quiero agradecer a mis compañeras y amigas Montserrat Tovar por acompañarme en todo momento en la carrera y recordándome siempre de lo que puedo ser capaz y a Isabel Nieto por alentarme y compartirme sus conocimientos y experiencias académicas.

## INDICE GENERAL

| Contenido   | Página |
|---|--------|
| INDICE GENERAL  | i      |
| INDICE DE CUADROS                                     | iii    |
| INDICE DE FIGURAS                                     | iv     |
| RESUMEN   |        |
| 1. ANTECEDENTES                                       | 1      |
| 1.1. La acuicultura                                   | 1      |
| 1.2. Cultivo de tilapia                               | 1      |
| 1.3. Importancia de la alimentación en la acuicultura | 2      |
| 1.4. Microalgas                                       | 3      |
| 1.4.1. Usos y aplicaciones                            | 4      |
| 1.4.2. Microalgas en la alimentación acuícola         | 5      |
| 2. HIPÓTESIS  | 6      |
| 3. OBJETIVOS  | 7      |
| 3.1. General  | 7      |
| 3.2. Específicos                                      | 7      |
| 4. METODOLOGÍA  | 8      |
| 4.1. Descripción general                              | 8      |
| 4.2. Métodos  | 8      |
| 4.2.1. Cultivo de microalgas                          | 8      |
| 4.2.2. Cultivo hiperintensivo de tilapia              | 9      |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.3. Biometrías en tilapia                   | 9  |
| 4.2.4. Determinación de la calidad del agua    | 10 |
| 4.2.5. Respirimetrías                          | 10 |
| 4.2.6. Determinación de calorías               | 10 |
| 4.2.7. Determinación de proteína               | 11 |
| 4.2.8. Determinación de parámetros productivos | 11 |
| 4.3. Diseño experimental                       | 12 |
| 5. RESULTADOS                                  | 14 |
| 5.1. Cultivo de microalgas                     | 14 |
| 5.2. Análisis bromatológicos                   | 14 |
| 5.3. Cultivo hiperintensivo de peces           | 15 |
| 5.4. Calidad de agua                           | 16 |
| 5.5. Biometrías                                | 17 |
| 5.6. Perfil metabólico                         | 18 |
| 5.7. Calorías y proteína                       | 20 |
| 5.8. Parámetros de producción                  | 21 |
| 6. DISCUSIÓN                                   | 22 |
| 7. CONCLUSIONES                                | 29 |
| 8. REFERENCIAS                                 | 30 |

## INDICE DE CUADROS

| Cuadro   | Página |
|--|--------|
| 1. Comparación de los resultados del análisis bromatológico para las dos cepas de microalgas y el alimento para peces Nutripec®  | 14     |
| 2. Balance teórico del porcentaje de nutrientes del alimento control y microalgas para la obtención de dietas.   | 15     |
| 3. Comparación de los resultados del análisis bromatológicos realizado a las mezclas suplementadas con microalgas <i>C. vulgaris</i> y <i>N. limnetica</i> .   | 15     |
| 4. Comparación de datos sobre el monitoreo de la calidad de agua del cultivo hiperintensivo de tilapia durante 8 semanas de experimentación.   | 16     |
| 5. Comparación de las pendientes de crecimiento durante el tiempo de experimentación para la determinación de la condición de los peces.   | 18     |
| 6. Comparación de las pendientes de crecimiento para la determinación del estado de salud relativa para cada uno de los tratamientos por las 8 semanas de experimentación.   | 19     |
| 7. Relación Oxígeno-Nitrógeno (O:N ratio) obtenida por la excreta de $\text{NH}_4$ de peces alimentados con diferentes dietas. CV para suplemento de <i>C. vulgaris</i> , NL para suplemento de <i>N. limnetica</i> y Control para alimento comercial. | 20     |
| 8. Porcentaje de proteína total corporal en peces alimentados con diferentes dietas.   | 21     |
| 9. Comparación de los parámetros productivos de un cultivo de <i>O. niloticus</i> alimentados con 6 diferentes suplementos de microalgas y alimento comercial.   | 21     |

## INDICE DE FIGURAS

| Figura   | Página |
|--|--------|
| 1. Diagrama de bloques de las actividades generales a realizar para la evaluación de parámetros productivos en un cultivo de tilapia utilizando un alimento comercial suplementado con microalgas.                         | 8      |
| 2. Tendencia de datos biométricos con relación peso-longitud de peces alimentados con suplemento de microalga <i>Nannochloropsis limnetica</i> .   | 17     |
| 3. Comportamiento de los datos numéricos en relación peso-longitud obtenidos de tilapias alimentadas con dieta suplementada con <i>Chlorella vulgaris</i> .  | 17     |
| 4. Comportamiento del consumo de O <sub>2</sub> (mg/L/g/h) en 24 horas de tilapias alimentadas con suplemento de microalga <i>Chlorella vulgaris</i> al 5% (azul), 10% (naranja), 15% (verde) y alimento comercial (rojo). | 18     |
| 5. Consumo de oxígeno (mg/L/g/h) durante 24 horas en tilapias suministrando suplemento de <i>N. limnetica</i> 5% (azul), 10% (naranja), 15% (verde) y alimento comercial (rojo).   | 19     |
| 6. Comparación del contenido calórico de tilapias alimentadas con dietas suplementadas con <i>C. vulgaris</i> (verde) y <i>N. limnetica</i> (naranja) a diferentes porcentajes y alimento comercial (rojo).                | 20     |

## RESUMEN

El costo del alimento es uno de los gastos más influyentes en la producción acuícola, ya que su costo aumenta según la calidad nutricia de los distintos productos en el mercado. Las microalgas por su variedad de biomoléculas componentes se han convertido en una fuente potencial de alimento para organismos acuáticos. El objetivo de este proyecto fue evaluar el efecto de una dieta suplementada con microalgas, específicamente *Chlorella vulgaris* y *Nannochloropsis limnetica* sobre los parámetros de producción en un cultivo de tilapia bajo condiciones controladas. El experimento consistió en la colocación de 20 peces de la especie *Oreochromis niloticus* en peceras con capacidad de 15 litros simulando condiciones de cultivo hiperintensivo, en un sistema de recirculación integrado con temperatura, pH y oxígeno. Los peces se aclimataron por 7 días siendo alimentados con 100% alimento comercial, posteriormente se dividieron en los tratamientos denominados: 5, 10, y 15% de acuerdo con el porcentaje de microalgas que contenían un control de alimento comercial. Durante el periodo experimental se monitoreó la calidad de agua ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ ) y se midió la condición metabólica al inicio y al final del experimento. Los resultados muestran una mayor tasa específica de crecimiento con el tratamiento 15% de suplemento con *C. vulgaris* (4.46%) y un peso individual ganado superior a los 0.2 g/día para todos los tratamientos en condiciones óptimas de crecimiento, demostrando que el alimento suplementado genera los mismo indicadores de producción que un alimento comercial. Las microalgas mostraron un alto potencial como fuente completa de nutrientes, sobre todo de proteína, para la alimentación acuícola



## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. La acuicultura

La acuicultura se puede definir como un mecanismo alternativo para la producción de animales y plantas acuáticas, generalmente para consumo humano, manteniendo el control de sus condiciones ambientales así como del organismo mismo (Montero-Rodríguez, 2013). Este sector ha tenido un desarrollo acelerado en los últimos años, convirtiéndose así en una de las principales fuentes de alimentación a nivel mundial. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) el porcentaje de productos proporcionados por el sector acuícola incrementó un 8.8% hasta el año 2010 y la aportación de pescado fresco proveniente de la producción acuícola aumentó hasta 56.4% a nivel mundial (FAO, 2012; Poot-López y col., 2013). Dentro de las revisiones sobre el estado de las pesquerías y acuicultura mundial realizadas por la FAO en 2016, se compartió que la acuicultura es responsable de aproximadamente el 44% de la producción de peces a nivel mundial (FAO, 2016; Roriz y col., 2017), significando esto que casi la mitad del pescado consumido en el mundo se lo debemos a este sector.

En México, al igual que en otros países, la acuicultura continúa siendo un sector con gran desarrollo y potencial, no solo para la producción de alimentos, si no como una fuente de generación de empleo y sustento familiar. Especies de agua dulce como la tilapia, trucha, bagre y carpa, así como el camarón, langostino, rana toro, entre otros, son parte de las especies que se cultivan con estas prácticas de manejo (Platas-Rosado y Vilaboa-Arroniz, 2014).

### 1.2. Cultivo de tilapia

La tilapia, junto con toda su variedad de especies, se coloca como el segundo grupo de peces de cultivo más importante tras las especies de carpa. Es un organismo que se desarrolla de mejor manera en ambientes tropicales y subtropicales y es de alimentación tipo omnívora. Según la FAO en 2004 la tilapia ascendió al octavo puesto de popularidad entre peces y mariscos en los Estados Unidos, siendo la especie *Oreochromis niloticus* la más relevante en la producción (Rakocy, 2005). Al

igual que otras especies de tilapia, resulta ideal para ser cultivada en sistemas acuícolas ya que presenta una gran tolerancia a los cambios de temperatura, tiene una alta tasa de crecimiento y reproducción, es relativamente resistente a la baja calidad de agua e incluso fuerte ante ciertas enfermedades (Rakocy, 2005). Además una de las principales características es su adaptabilidad y tolerancia en su alimentación. Puede desarrollarse con alimentos a base de bajo contenido de proteína y alta cantidad de carbohidratos, incluso logra tolerar alimentos preparados con proteína vegetal (Rakocy, 2005). Por estas y algunas otras características más es que el cultivo de tilapia se ha expandido rápidamente en el mundo, tanto en sistemas relativamente caseros hasta sistemas de producción intensiva (Skov y col., 2017). A pesar del enorme impacto y producción acuícola de esta especie, aún existen preguntas sin resolver sobre parámetros más específicos del sistema y la especie, la alimentación es uno de ellos.

### 1.3. Importancia de la alimentación en la acuicultura

Como ya se ha mencionado anteriormente, debido a que la acuicultura es un sistema monitoreado, dependerá su funcionamiento de varios factores. La especie y la etapa de desarrollo en la que se cultiva, área de cultivo, factores climáticos y el manejo del sistema, entran en los factores con mayor importancia para llevar a cabo un buen cultivo (Nadarajah y Flaaten, 2017). Así mismo, la alimentación del pez durante el cultivo se convierte en un factor importante en la producción, ya que a partir de este dependerá la calidad de la especie y hoy en día representa uno de los gastos más influyentes en los sistemas acuícolas.

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de alimentos destinados a especies acuáticas, éstos presentan una diversidad de balances nutricionales aparentemente ideales para los organismos a cultivar, sin embargo, entre mayor sea la calidad de estos alimentos, su costo se ira elevando igualmente. En la acuicultura comercial la alimentación es el factor más influyente ya que esta aunado al crecimiento y calidad de la carne del pescado, por lo tanto los costos de alimentación han llegado a representar entre un 40 y 50% del costo total de producción (Poot-López y col., 2013).

Dentro de los requerimientos esenciales en la alimentación de peces, las fuentes energéticas como las proteínas, lípidos y carbohidratos sin duda deben proporcionarse para el correcto crecimiento de las especies, lamentablemente estos son los que resultan ser más costosos en la formulación del alimento; especialmente el alto contenido de proteína en un alimento es asociado a un alimento costoso (Xie y col., 2017). Los carbohidratos y lípidos entonces se convierten en la mayor fuente de energía en las dietas para peces. Muchos alimentos comerciales acuícolas han decidido elevar las cantidades de estos dos últimos, vendiendo un alimento no tan balanceado y así logrando disminuir su costo, sin embargo, aún no se han detectado de manera específica los efectos que una dieta con exceso de lípidos y carbohidratos pueda provocar en el pez, especialmente en la tilapia (Xie y col., 2017).

Aunque la industria alimentaria dedicada a especies acuáticas ha incrementado su producción y desarrollo hasta un 11% según la FAO (Xie y col., 2017), se sigue en búsqueda de nuevas fórmulas más eficientes para satisfacer las necesidades de los productores acuícolas tanto en costo como calidad. Es por eso que desarrollar una alternativa alimenticia para los sistemas acuícolas se ha convertido en uno de los nuevos retos para mejorar la eficiencia del cultivo de peces.

#### 1.4. Microalgas

Por más de 40 años, las microalgas han estado bajo el interés de los científicos ya que resultan ser uno de las formas de vida más antiguas en el mundo. Estas son microorganismos unicelulares que contienen clorofila y pigmentos fotosintéticos (Benemann, 1992; Taelman y col., 2013; Gómez-Jacinto, 2015) y en los últimos años han tomado mayor popularidad en la sociedad debido a que se les han encontrado múltiples aplicaciones tanto por su fisiología como por sus componentes celulares.

Las microalgas pueden convertir la luz solar en energía química gracias a su eficiente actividad fotosintética, fijando CO<sub>2</sub> y liberando mayor cantidad de O<sub>2</sub> que cualquier planta terrestre, siendo eficientes en esta actividad incluso hasta 10 veces más que estas últimas (Sathasivam y col., 2017). Existen aproximadamente 50,000 especies de microalgas presentes en océanos, ríos, estanque y lagos, pero únicamente son

30,000 las que han sido estudiadas (Gómez-Jacinto, 2015; Sathasivam y col., 2017). Se han convertido en un foco de atención debido a su gran biodiversidad entre especies, así como por su facilidad de cultivo, rápido crecimiento y por su producción y acumulación de metabolitos que resultan de gran interés.

Dentro de la gran variedad de compuestos bioactivos y biomoléculas que se han descrito en las microalgas encontramos grandes cantidades de carbohidratos, proteínas, lípidos y antioxidantes (Taelman y col., 2013). Entre los más importantes podemos mencionar a los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs por sus siglas en inglés), especialmente el omega-3 y omega-6 presentes como ácido eicosapentaenoico (EPA), ácido docosahexaenoico (DHA) y ácido araquidónico (AA); vitaminas y carotenoides como el Beta-caroteno y la astaxantina, además cuentan generalmente con todos los aminoácidos esenciales (Brown, 2002; Taelman y col., 2013; Gómez-Jacinto, 2015; Sathasivam y col., 2017)

#### 1.4.1. Usos y aplicaciones

Las microalgas han llegado a ser acreedoras de una variedad de aplicaciones y usos. Actualmente han sido utilizadas con fines energéticos, como es la obtención de biodiesel, bioetanol y biogás, así como se ha buscado que sean aplicadas para la obtención de productos de alto valor añadido en campos como la nutrición, salud humana, acuicultura, cosméticos, agricultura, entre muchos otros que siguen en desarrollo (Taelman y col., 2013; Gómez-Jacinto, 2015). Es en la nutrición humana y animal en donde se ha logrado obtener resultados bastante beneficiosos y prometedores, ya que desde la década de 1950 se han realizado esfuerzos por explotar fuentes nuevas y alternativas de proteínas y suplementos alimenticios que logran satisfacer las necesidades de la población (Gómez-Jacinto, 2015).

Al estar compuestas de varias biomoléculas tan útiles y funcionales, las microalgas se han traducido como una fuente de alimento esencial para los animales, especialmente para las especies acuáticas, ya que cabe mencionar que las algas son la base de la cadena alimentaria acuática y son consumidas por las especies en distintas etapas de su desarrollo (Taelman y col., 2013).

#### 1.4.2. Microalgas en la alimentación acuícola

En la acuicultura se han utilizado gran variedad de microalgas como son *Spirulina*, *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Isochrysis*, *Pavlova*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*, *Nannochloropsis*, *Skeletonema* y *Thalassiosira*, con el objetivo de mejorar el estado nutricional de las especies cultivadas. Comúnmente, los alimentos utilizados por los productores acuícolas están basados en harina de pescado, lo que hace más costosa la producción debido al alto costo de estos productos por su gran contenido de proteína principalmente. Se estima que es necesario producir más de 1 kg de pescado destinado a productos alimentarios para poder obtener 1 kg de pescado en cultivo para su venta comercial, haciendo insostenible la actividad (Taelman y col., 2013). Es por eso que crear productos que proporcionen la misma nutrición pero con un menor costo se ha convertido en una misión importante para la acuicultura y las microalgas se convierten en una de las opciones más viables para el mercado. Svircev en 2005 reportó que utilizando algunas especies de microalgas en la dieta de peces incrementó su valor nutricional y disminuyó un 50% su costo de producción (Taelman y col., 2013) dejando así claro que las microalgas representan una alternativa nutricional bastante viable. Las microalgas se han utilizado mayormente en los estados larvarios y juveniles de algunas especies debido a su facilidad de consumo para éstas.

El género *Spirulina* es el más utilizado como alimento en la acuicultura, principalmente para especies tropicales y debido a su gran cantidad de pigmentos (Sathasivam y col., 2017). *Chlorella* también ha sido utilizada como suplemento para alimentos de animales acuáticos y se han observado buenos resultados. *Nannochloropsis* ha sido utilizada por su alto contenido de PUFAs y sus eficientes tasas de crecimiento aplicado al rotífero *Brachionus plicatilis*, resultando además ser un posible sustituto de *Chlorella* en la acuicultura (Freire y col., 2016; Sathasivam y col., 2017). Existe una gran diversidad de investigaciones respecto a estas dos últimas microalgas presentando resultados favorables respecto a su aplicación en la acuicultura, sin embargo, aún no se logra obtener resultados concisos y objetivos sobre su uso en las diferentes especies.

## **2. HIPÓTESIS**

La aplicación de una dieta suplementada con microalgas, especialmente con *Chlorella vulgaris* y *Nannochloropsis limnetica*, en un cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) afectará positivamente los parámetros de producción de éste, observando un cambio en el peso, talla y contenido calórico y proteico de la especie.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. General

Evaluar el efecto de un alimento suplementado con dos diferentes tipos de microalgas en los parámetros de producción de un cultivo hiperintensivo de tilapia.

#### 3.2. Específicos

- Evaluar el desarrollo y contenido calórico y proteico en tilapia alimentada con una dieta conformada por Nutripec® y suplementada con distintas concentraciones de *Chlorella vulgaris*.
- Comparación del desarrollo y contenido calórico y proteico de la tilapia alimentada con una dieta a base de alimento comercial Nutripec® y suplemento de *Nannochloropsis limnetica* a distintas concentraciones.
- Definir el efecto del uso de un alimento enriquecido con microalgas sobre los parámetros de producción de un cultivo hiperintensivo de tilapia.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Descripción general

En la Figura 1 se presenta un diagrama de bloques que indica de manera general las actividades que se realizaron para evaluar el efecto de un alimento suplementado con microalgas sobre los parámetros de producción en un cultivo hiperintensivo de tilapia del Nilo.

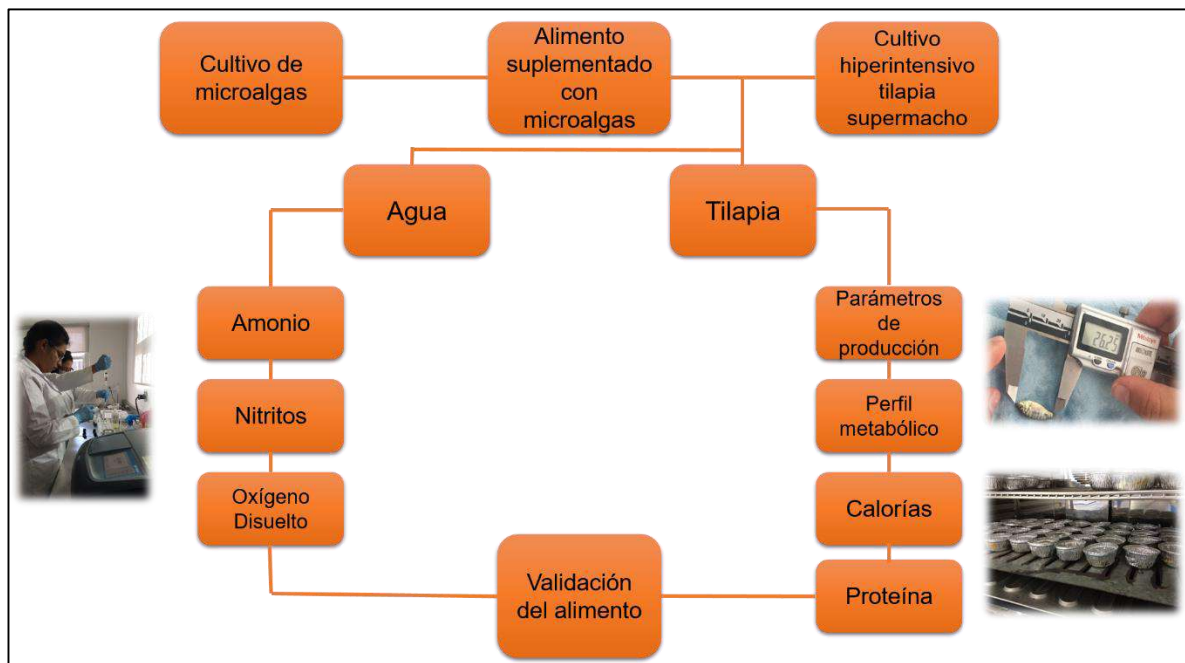


Figura 1. Diagrama de bloques de las actividades generales a realizar para la evaluación de parámetros productivos en un cultivo de tilapia utilizando un alimento comercial suplementado con microalgas.

### 4.2. Métodos

#### 4.2.1. Cultivo de microalgas

Las microalgas utilizadas para la experimentación fueron obtenidas con el apoyo del Laboratorio de Microalgas UAQ-FINKA ubicado en las instalaciones de la empresa Finka Ahuehuetes S.A. de C.V. dentro del Agropark en el municipio de Colón, Querétaro. El cultivo inició con la previa adaptación de las cepas obtenidas de cada microalga, *Chlorella vulgaris* y *Nannochloropsis limnetica*, utilizando un medio BG11 al 2% y controlando condiciones ambientales como luz, pH y temperatura, se dejaron



en adaptación por un mes. Posteriormente se tomó un inóculo con una densidad de 0.2 g/L para después colocarlo en botellas de 1 L con agua residual de invernadero como medio de cultivo. Para lograr la obtención de mayor biomasa microalgal se continuó con el escalamiento del cultivo en una proporción 1:10, primero en un biorreactor de 60 L y después en un fotobiorreactor exterior de 600 L. Cuando se logró obtener la densidad de cultivo deseada se procedió a una cosecha continua utilizando una centrifuga industrial para su separación y posterior almacenamiento a -20°C en bolsas sellables, inmediatamente se adicionó a los reactores agua residual de invernadero con un volumen igual al extraído para la cosecha. Finalmente se llevó a un horno de convección forzada para su secado por tres días a 40°C y se molió en licuadora para que pueda ser utilizada como suplemento de los alimentos.

Para llevar a cabo esta experimentación se solicitó al laboratorio microalga de la especie *C. vulgaris* y *N. limnetica*.

#### 4.2.2. Cultivo hiperintensivo de tilapia

Se utilizó un rack de 2.35 m de alto por 1.90 m de ancho diseñado especialmente para el cultivo de peces de forma hiperintensiva en el cuál se controlan las condiciones de cultivo: oxigenación constante, temperatura por medio de un termostato y chiller para lograr mantenerla a 28°C +/- 1°C, iluminación con luz blanca con fotoperiodo 12 h luz y 12 h oscuridad y pH del agua entre 7 y 9. El sistema cuenta con una bomba que recircula el agua del cultivo, tres filtros para la limpieza de la misma y 30 peceras de acrílico de una capacidad de 15 L.

Para la evaluación de los parámetros de producción se utilizaron tilapias de la especie *Oreochromis niloticus* en etapa de desarrollo (juvenil), variedad supermacho provenientes de la granja Xidedo ubicada en Ixmiquilpan, estado de Hidalgo. El experimento se llevó a cabo durante 8 semanas en las instalaciones del Laboratorio de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala.

#### 4.2.3. Biometrías en tilapia

Una vez por semana se tomaron biometrías a 3 peces de cada pecera (9 por cada tratamiento), estas constaron de pesaje y toma de longitud. El peso se midió con

ayuda de una balanza Precisa BJ610C en donde se colocó un vaso con agua, se marcó en ceros la balanza y se introdujo al pez dentro del vaso para obtener así su peso húmedo. La talla se midió con un vernier Mitutoyo Absolute IP67.

#### 4.2.4. Determinación de la calidad del agua

Se analizó la calidad del agua de las peceras del sistema midiendo diariamente oxígeno disuelto, temperatura, pH y salinidad con una sonda HQ40d marca HACH. Así mismo, se tomó una muestra de agua semanalmente para poder medir los productos de Nitrógeno, Nitritos por el método de diazotización (Método HACH 8507, 2010; Adaptado de USEPA, 1979) y Amonio por el método Nessler (Método HACH 8038, 2010; Adaptado de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 4500-NH3 B & C), la absorbancia fue medida en un espectrofotómetro portátil DR/6000, HACH Company, Loveland Colorado, USA.

#### 4.2.5. Respirometrías

Para poder determinar aspectos fisiológicos y energéticos de los peces como la tasa de consumo de oxígeno y su actividad metabólica se realizaron dos respirometrías, una al inicio de la experimentación y la segunda al finalizar. Este método consiste 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 monitorearon 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-NH3 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, 2013).

#### 4.2.6. Determinación de calorías

Para obtener el contenido calórico las tilapias fueron sacrificadas, se secaron en un horno Beschickung/Loading 100-800 Memmert a 30°C de temperatura y

posteriormente fueron molidas. De estas muestras obtenidas se tomaron entre 0.5 y 1 g para elaborar una pastilla por cada tratamiento y se incineraron en un calorímetro de la marca Parr modelo 6200.

#### 4.2.7. Determinación de proteína

Para determinar proteína en los peces se obtuvieron las muestras secas y molidas como se ha mencionado en el procedimiento anterior. Posteriormente se realizó una digestión de las muestras por el método de TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) asistido con aparato Digesdahl y se analizaron las digestiones por el método espectrofotométrico Nessler (Método HACH 8075, 2010) en un espectrofotómetro portátil DR/6000, HACH Company.

#### 4.2.8. Determinación de parámetros productivos

Al realizar todas estas mediciones se podrán recabar varios datos importantes con los cuales será posible obtener los siguientes parámetros:

- Supervivencia % = (Organismos finales por 100/ organismos iniciales)
- Peso ganado % =  $100 * [(Peso\ final - peso\ inicial) / peso\ inicial]$ : este parámetro indica cuanto peso gana el individuo en un periodo de tiempo.
- Tasa Específica de Crecimiento %/día (T.E.C.) =  $100 \ln (peso\ final - \ln\ peso\ inicial) / días\ del\ experimento$ : indica la tasa a la que está aumentando el crecimiento del individuo en un periodo de tiempo.
- Peso ganado individual g/día =  $[(Peso\ final - peso\ inicial) / Edad\ en\ días]$ : indica cuanto aumenta en peso un individuo en promedio por día.
- Alimento consumido individual g/día = (Sumatoria del alimento individual dado por semana/ # de días): cuanto alimento consume un individuo en promedio por día.
- Tasa de Conversión Alimenticia (T.C.A.) = Alimento ingerido / Peso ganado individual (ambas en gramos): eficiencia con la que los individuos convierten

el alimento ingerido en biomasa. Valores bajos indican gran eficiencia en el uso del alimento.

- Consumo de proteína g/día =  $\text{Peso ganado individual} \times (\text{Proteína alimento \%BH}/100)$ : cuanta proteína es consumida diariamente por el individuo.
- Consumo de nitrógeno =  $\text{Consumo de proteína (g/día)} \times 6.25$ : cuanto nitrógeno es asimilado diariamente por el individuo.
- Nitrógeno retenido =  $\frac{((\text{Peso final promedio} \times \text{Proteína cuerpo final}) - (\text{Peso inicial promedio} \times \text{Proteína cuerpo inicial}))}{100 / \# \text{ de días}} / 6.25$ : cuanto nitrógeno es asimilado por el pez.
- Relación de eficiencia proteica (P.E.R.) =  $\frac{\text{Peso ganado individual}}{\text{Consumo de proteína}}$ : este parámetro da una idea de la calidad de la proteína, si el pez no crece, este valor será de 0.
- Uso aparente de Nitrógeno % (U.A.N.) =  $100 \times (\text{N retenido} / \text{Consumo de N})$

#### 4.3. Diseño experimental

Se colocaron 20 peces por cada una de las peceras a utilizar con un acomodo al azar.

Para lograr evaluar el efecto de las microalgas sobre el desarrollo del pez, se buscó comparar una dieta ya conocida con respecto a una suplementada, por lo tanto, se tomó como control una dieta a base de alimento comercial Nutripec<sup>®</sup> de la marca Purina y se comparó con el uso de este mismo alimento, pero enriquecido con las microalgas *C. vulgaris* y *N. limnetica* en las siguientes proporciones:

1. Alimento comercial 100%
2. Alimento comercial 95% + 5% de microalga
3. Alimento comercial 90% + 10% de microalga
4. Alimento comercial 85% + 15% de microalga

Es importante mencionar que a las dietas propuestas se les realizaron análisis bromatológicos para conocer la composición tanto del alimento comercial como de la biomasa microalgal.

Para iniciar la experimentación, se les proporcionó a todos los peces una dieta control (100% alimento comercial) por 7 días para su adaptación a la alimentación y a las prácticas de manejo. Posteriormente se les aplicaron las 4 dietas previamente propuestas, contando las dietas por cada microalga, con tres replicas por tratamiento. El alimento se proporcionó en forma de polvo, esto para asegurar la homogenización en las mezclas. Se alimentó a los peces tres veces al día a las 8, 12 y 16 horas.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Cultivo de microalgas

Las microalgas utilizadas en el experimento se obtuvieron del Laboratorio UAQ-FINKA ubicado en las instalaciones de la empresa Finka Ahuehuetes S.A. de C.V. dentro del Agropark en el municipio de Colón, Querétaro. El cultivo y escalamiento de la biomasa microalgal se llevó a cabo en el laboratorio UAQ-FINKA ya que en este se cuenta con un sistema de producción intensiva de fotobiorreactores tubulares (FBR) de 60L y 600L. El proceso de producción termina con la cosecha, secado y molienda de la biomasa microalgal de la que se obtuvieron 5 kg por cada especie. Se introdujo el polvo obtenido en bolsas plásticas sellables para ser transportado a las instalaciones del Laboratorio de Bioingeniería, Campus Amazcala, UAQ. A partir de estas muestras se hicieron las determinaciones fisicoquímicas.

### 5.2. Análisis bromatológicos

Para el análisis de humedad (%), cenizas (%), proteína (%), lípidos (%) y carbohidratos (%) se tomaron 5g de muestra de cada una de las microalgas y la misma cantidad para el alimento comercial, Cuadro 1.

Cuadro 1. Comparación de los resultados del análisis bromatológico para las dos cepas de microalgas y el alimento para peces Nutripec®

| Determinación (%) | <i>C. vulgaris</i> | <i>N. limnetica</i> | Alimento  |
|-------------------|--------------------|---------------------|-----------|
|                   |                    |                     | Comercial |
| Proteína          | 46.68              | 37.75               | 26.88     |
| Lípidos           | 9.48               | 13.76               | 5.13      |
| Carbohidratos     | 17.25              | 21.54               | 50.11     |
| Ceniza            | 17.6               | 17.76               | 8.72      |
| Humedad           | 8.99               | 9.19                | 9.00      |

Los resultados del balance teórico de nutrientes para la obtención del alimento comercial suplementado con microalga se muestra en el Cuadro 2. La mezcla 1 consta de 5% de *C. vulgaris* (CV) y 95% alimento comercial (AC), la mezcla 2, 10% CV y 90% AC, mezcla 3 con 15% CV y 85% AC, la mezcla 4 estaba compuesta por

5% *N. limnetica* (NL) y 95% AC, mezcla 5 10% NL y 90% AC y la mezcla 6 15% NL con 85% AC. El control constaba de 100% alimento comercial.

Cuadro 2. Balance teórico del porcentaje de nutrientes del alimento control y microalgas para la obtención de dietas.

|          | Proteína<br>(%) | Lípidos<br>(%) | Carbohidratos<br>(%) | Humedad<br>(%) | Cenizas<br>(%) |
|----------|-----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|
| Mezcla 1 | 27.86           | 5.52           | 47.25                | 9.19           | 9.18           |
| Mezcla 2 | 28.84           | 5.91           | 45.86                | 9.38           | 9.65           |
| Mezcla 3 | 29.82           | 6.30           | 44.10                | 9.55           | 10.10          |
| Mezcla 4 | 26.35           | 5.65           | 48.21                | 8.99           | 9.30           |
| Mezcla 5 | 25.83           | 6.18           | 47.79                | 8.98           | 9.88           |
| Mezcla 6 | 25.30           | 6.70           | 47.37                | 8.98           | 10.47          |
| Control  | 26.88           | 5.13           | 50.11                | 9              | 8.72           |

El análisis bromatológico y la comparación de los resultados para cada una de las mezclas elaboradas se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Comparación de los resultados del análisis bromatológicos realizado a las mezclas suplementadas con microalgas *C. vulgaris* y *N. limnetica*.

|          | Proteína<br>(%) | Lípidos<br>(%) | Carbohidratos<br>(%) | Humedad<br>(%) | Cenizas<br>(%) |
|----------|-----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|
| Control  | 16.667          | 11.142         | 59.234               | 6.595          | 6.362          |
| Mezcla 1 | 23.169          | 11.222         | 52.005               | 7.036          | 6.567          |
| Mezcla 2 | 19.793          | 10.478         | 55.515               | 7.127          | 7.086          |
| Mezcla 3 | 16.176          | 12.175         | 56.780               | 7.815          | 7.052          |
| Mezcla 4 | 20.046          | 11.572         | 54.141               | 9.200          | 5.039          |
| Mezcla 5 | 18.671          | 11.777         | 56.892               | 7.638          | 5.020          |
| Mezcla 6 | 18.081          | 12.747         | 55.063               | 8.097          | 6.009          |

Al finalizar los análisis de los alimentos ya mezclados se almacenaron en frascos de plástico con tapa para facilitar su uso durante la experimentación.

### 5.3. Cultivo hiperintensivo de peces

Se logró establecer el cultivo de peces simulando condiciones hiperintensivas usando un sistema de recirculación de agua, oxigenación continua y temperatura a

28°C. Por cada pecera se colocaron 20 peces de la especie *O. niloticus* variedad supermacho de aproximadamente 0.8 g y se dejaron en aclimatación por una semana alimentándolos con alimento comercial.

Aunque durante la experimentación se tuvieron algunos problemas por fugas de agua, obstrucciones por suciedad y variaciones en la oxigenación debido a la densidad de peces por pecera, se lograron detectar a tiempo para que no influyeran en las condiciones del experimento. Se realizaba una limpieza constante del sistema para evitar las obstrucciones de las tuberías y se mantuvo encendido hasta 4 horas continuas el oxigenador para mantener una concentración idónea para los peces.

#### 5.4. Calidad de agua

Se mantuvo en monitoreo la calidad de agua, tomando una muestra semanal para evaluar los productos de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$  y  $\text{NH}_4$ ), así como para conocer el pH, oxígeno disuelto, temperatura y salinidad del agua de cultivo. Los datos obtenidos durante el experimento se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Comparación de datos sobre el monitoreo de la calidad de agua del cultivo hiperintensivo de tilapia durante 8 semanas de experimentación.

| Semana | Nitrógeno amoniacal (mg/L) | Nitritos (mg/L) | Conductividad (( $\mu$ )S/cm) | Oxígeno disuelto (mg/L) | Salinidad (0/00) | pH   |
|--------|----------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|------|
| 1      | 6.73                       | 5.98            | 35.20                         | 2.94                    | 22.52            | 7.69 |
| 2      | 2.12                       | 0.48            | 32.76                         | -                       | 20.97            | 8.07 |
| 3      | 0.22                       | 0.17            | 35.50                         | 4.08                    | 22.72            | 7.41 |
| 4      | 0.66                       | 0.59            | 28.03                         | 5.32                    | 17.94            | 7.65 |
| 5      | 1.33                       | 0.52            | 37.70                         | 1.70                    | 24.13            | 7.78 |
| 6      | 0.59                       | 0.25            | 44.63                         | 3.05                    | 28.56            | 7.92 |
| 7      | 0.55                       | 0.48            | 41.46                         | 6.94                    | 26.53            | 7.76 |
| 8      | 0.73                       | 1.36            | 43.86                         | 9.41                    | 28.07            | 7.81 |

Los parámetros eran medidos inmediatamente después de la toma de muestra para obtener resultados más reales respecto a las condiciones del agua de cultivo.



## 5.5. Biometrías

El análisis de los datos merísticos permitió obtener un modelo general de crecimiento para el suplemento con *N. limnetica*:  $\text{Peso} = \exp(-9.44097 + 2.76457 \cdot \ln(\text{Longitud patrón}))$ , y para el suplemento con *C. vulgaris*:  $\text{Peso} = \exp(-9.24589 + 2.71902 \cdot \ln(\text{Longitud patrón}))$  por medio de una regresión lineal ajustada a modelo multiplicativo en la que se relacionó el peso (g) y la longitud (mm) de los individuos que se pueden observar en las Figuras 2 y 3, de las cuales se obtuvieron pendientes igual a 2.76457 y 2.71902 respectivamente. La comparación de las pendientes obtenidas durante 8 semanas del experimento permite contrastar la salud relativa de los peces (Cuadro 5).

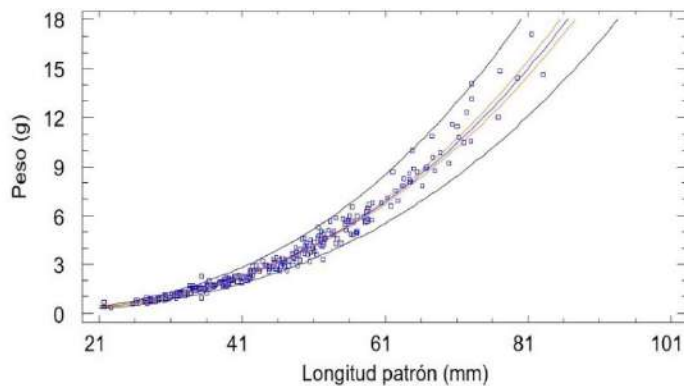


Figura 2. Tendencia de datos biométricos con relación peso-longitud de peces alimentados con suplemento de microalga *Nannochloropsis limnetica*.

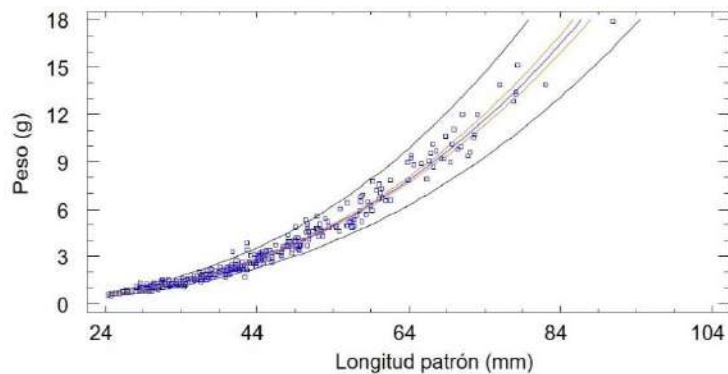


Figura 3. Comportamiento de los datos numéricos en relación peso-longitud obtenidos de tilapias alimentadas con dieta suplementada con *Chlorella vulgaris*.

Cuadro 5. Comparación de las pendientes de crecimiento durante el tiempo de experimentación para la determinación de la condición de los peces.

| Tiempo<br>(semanas) | Pendiente (m)      |                     |         |
|---------------------|--------------------|---------------------|---------|
|                     | <i>C. vulgaris</i> | <i>N. limnetica</i> | Control |
| 0                   | 1.77               | 1.74                | 0.43    |
| 1                   | 2.94               | 2.99                | 3.20    |
| 2                   | 2.71               | 2.7                 | 2.83    |
| 3                   | 2.64               | 2.69                | 2.59    |
| 4                   | 2.6                | 2.69                | 2.71    |
| 5                   | 2.8                | 2.49                | 2.81    |
| 6                   | 2.51               | 2.78                | 2.87    |
| 7                   | 2.58               | 2.76                | 2.91    |
| 8                   | 2.49               | 2.63                | 2.55    |

Se compararon las pendientes obtenidas por cada semana de la experimentación y por cada suplemente de microalgas respecto al control para determinar la condición de los peces de acuerdo al cambio de su alimentación.

#### 5.6. Perfil metabólico

Se realizaron dos respirometrías, al inicio y al final del experimento, para comparar el comportamiento de las tilapias respecto a su tasa metabólica ya que es posible conocerla indirectamente por medio del consumo de oxígeno (Figura 4 y 5).

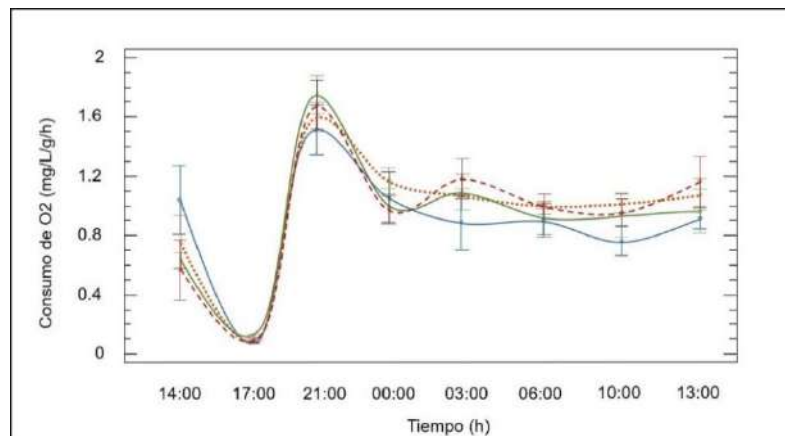


Figura 4. Comportamiento del consumo de O<sub>2</sub> (mg/L/g/h) en 24 horas de tilapias alimentadas con suplemente de microalga *Chlorella vulgaris* al 5% (azul), 10% (naranja), 15% (verde) y alimento comercial (rojo).

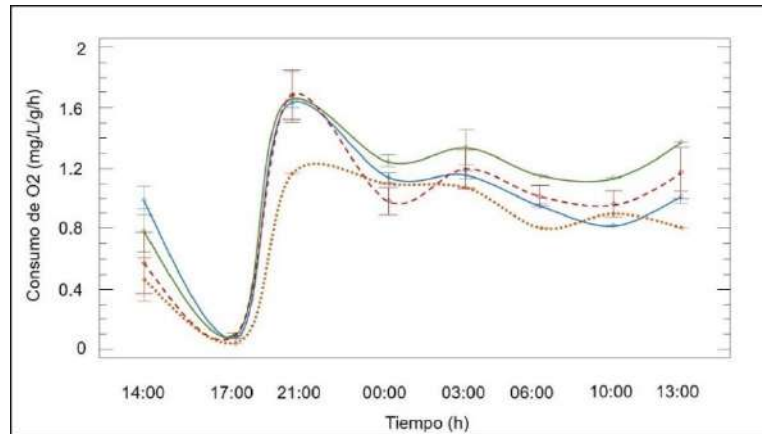


Figura 5. Consumo de oxígeno (mg/L/g/h) durante 24 horas en tilapias suministrando suplemento de *N. limnetica* 5% (azul), 10% (naranja), 15% (verde) y alimento comercial (rojo).

Para poder relacionar el consumo de oxígeno respecto a la condición de salud relativa de los peces, se calcularon las pendientes con la relación peso-longitud para cada mezcla por medio de una regresión lineal ajustada a modelo multiplicativo durante las 8 semanas de experimentación y se presentan de forma comparativa en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Comparación de las pendientes de crecimiento para la determinación del estado de salud relativa para cada uno de los tratamientos por las 8 semanas de experimentación

| Mezcla  | Pendiente (m) |
|---------|---------------|
| Control | 2.7917        |
| 1       | 2.6911        |
| 2       | 2.6778        |
| 3       | 2.7752        |
| 4       | 2.8107        |
| 5       | 2.7458        |
| 6       | 2.7811        |

Además, con los datos obtenidos del análisis de la respirometría se logró calcular la relación Oxígeno consumido-Nitrógeno excretado (Cuadro 7) por cada tratamiento.

Cuadro 7. Relación Oxígeno-Nitrógeno (O:N ratio) obtenida por la excreta de NH<sub>4</sub> de peces alimentados con diferentes dietas. CV para suplemento de *C. vulgaris*, NL para suplemento de *N. limnetica* y Control para alimento comercial.

| Tiempo (h) | Dietas suplementadas |        |        |       |        |        |         |
|------------|----------------------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|
|            | 5% CV                | 10% CV | 15% CV | 5% NL | 10% NL | 15% NL | Control |
| 14:00      | 8.88                 | 4.83   | 6.86   | 5.77  | 2.88   | 3.57   | 4.26    |
| 17:00      | 0.53                 | 0.65   | 0.84   | 0.32  | 0.21   | 0.54   | 0.85    |
| 21:00      | 18.34                | 15.32  | 21.18  | 9.76  | 5.06   | 49.21  | 19.08   |
| 00:00      | 98.74                | 9.98   | 0.00   | 40.37 | 4.89   | 49.07  | 20.30   |
| 03:00      | 16.36                | 8.00   | 82.98  | 13.60 | 3.95   | 21.02  | 19.28   |
| 06:00      | 13.06                | 21.47  | 15.93  | 13.83 | 5.02   | 22.99  | 17.10   |
| 10:00      | 14.55                | 26.60  | 18.06  | 12.77 | 5.99   | 16.25  | 44.42   |
| 13:00      | 15.36                | 18.48  | 11.30  | 13.15 | 5.17   | 21.13  | 31.88   |

Este último cuadro nos permitirá conocer el funcionamiento del metabolismo de acuerdo a los nutrientes proporcionados por los distintos alimentos.

### 5.7. Calorías y proteína

Para conocer el efecto del cambio de alimentación directamente en el pez, se determinó el contenido calórico (Figura 6) y de proteína (Cuadro 8) en los individuos al inicio y al final del experimento.

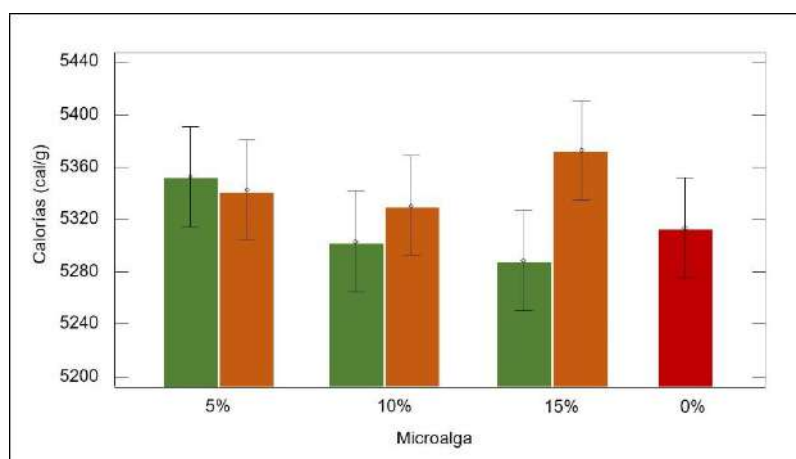


Figura 6. Comparación del contenido calórico de tilapias alimentadas con dietas suplementadas con *C. vulgaris* (verde) y *N. limnetica* (naranja) a diferentes porcentajes y alimento comercial (rojo).

Cuadro 8. Porcentaje de proteína total corporal en peces alimentados con diferentes dietas.

| Mezcla  | %Proteína Total |
|---------|-----------------|
| Inicial | 51.491          |
| Control | 52.044          |
| 1       | 53.301          |
| 2       | 51.024          |
| 3       | 50.895          |
| 4       | 50.288          |
| 5       | 51.188          |
| 6       | 48.494          |

#### 5.8. Parámetros de producción

Finalmente recabando y relacionando todos los datos obtenidos de las mediciones previamente mencionadas se logró calcular cada uno de los parámetros que se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Comparación de los parámetros productivos de un cultivo de *O. niloticus* alimentados con 6 diferentes suplementos de microalgas y alimento comercial.

|                          | Control  | Mezcla 1 | Mezcla 2 | Mezcla 3 | Mezcla 4 | Mezcla 5 | Mezcla 6 |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Numero inicial           | 20.00    | 20.00    | 20.00    | 20.00    | 20.00    | 20.00    | 20.00    |
| Número final             | 16.00    | 18.00    | 18.00    | 14.00    | 17.00    | 18.00    | 19.00    |
| Supervivencia (%)        | 80.00    | 90.00    | 90.00    | 70.00    | 85.00    | 90.00    | 95.00    |
| Peso inicial (g)         | 0.80     | 1.10     | 1.09     | 1.18     | 0.86     | 0.97     | 0.76     |
| Peso Inic. prom. (g)     | 0.04     | 0.06     | 0.05     | 0.06     | 0.04     | 0.05     | 0.04     |
| Peso final (g)           | 12.06    | 9.01     | 9.67     | 10.07    | 7.98     | 6.15     | 7.43     |
| Peso final prom. (g)     | 0.75     | 0.50     | 0.54     | 0.72     | 0.47     | 0.34     | 0.39     |
| Peso ganado (%)          | 1796.23  | 809.01   | 884.02   | 1115.34  | 990.97   | 607.54   | 935.20   |
| Peso ganado ind. (g/día) | 0.01     | 0.23     | 0.01     | 0.31     | 0.39     | 0.39     | 0.33     |
| Alim. cons. ind. (g/día) | 0.02     | 0.02     | 0.02     | 0.02     | 0.02     | 0.02     | 0.02     |
| T.E.C. (%/día)           | 5.25     | 3.94     | 4.08     | 4.46     | 4.27     | 3.49     | 4.17     |
| T.C.A.                   | 1.98     | 0.09     | 2.66     | 0.07     | 0.06     | 0.06     | 0.07     |
| Consumo Proteína (g/día) | 0.00324  | 0.00448  | 0.00382  | 0.00310  | 0.00433  | 0.00392  | 0.00360  |
| Consumo de N (g/día)     | 0.00052  | 0.00072  | 0.00061  | 0.00050  | 0.00069  | 0.00063  | 0.00058  |
| N retenido (g/día)       | 1.91E-04 | 1.47E-04 | 1.38E-04 | 1.57E-04 | 1.29E-04 | 8.66E-05 | 9.35E-05 |
| P.E.R.                   | 3.11     | 1.58     | 2.01     | 2.56     | 1.76     | 1.34     | 1.76     |
| U.A.N. (%)               | 36.92    | 20.52    | 22.60    | 31.57    | 18.74    | 13.71    | 16.29    |

Las cifras calculadas nos permitirán evaluar que alimento resulto más eficiente para el cultivo de tilapias supermacho en condiciones hiperintensivas.

## 6. DISCUSIÓN

El objetivo de este proyecto fue evaluar los parámetros de producción de un cultivo de tilapia por medio de la medición de distintos factores, al cual se le proporcionó alimento suplementado con microalgas.

Según Skov y colaboradores (2017), el ingrediente con mayor costo en la alimentación acuícola comercial es la proteína, es por esto que suelen tener un bajo contenido de este nutriente. En los resultados obtenidos de los análisis bromatológicos observamos un valor de 26.88% en el alimento comercial, que comparándolo con el cuadro nutrimental del alimento, está debajo del mencionado (40%). Así mismo, se demuestra que las microalgas pueden proporcionar una mayor concentración de proteína a la alimentación acuícola. Freire y col. determinaron en 2016 la composición bioquímica de *N. limnetica* bajo condiciones de cultivo semi-continuo utilizando un medio de cultivo OHM obteniendo valores de proteína de 2.51 pg/célula. En 2017 Tibbetts y colaboradores obtuvieron 30.4% de proteína cruda en *C. vulgaris* al cultivarla en fotobiorreactores de 1000 L. Comparando los resultados del Cuadro 1, se tiene un mayor porcentaje de proteína para ambas microalgas debido a la forma en que se produjeron, el medio de cultivo y las condiciones que se le proporcionaron, así como algún pre tratamiento llevado a cabo al microorganismo. Es decir, las condiciones de cultivo afectaran la composición bioquímica de las microalgas (Krienitz y Wirth, 2006; Freire y col., 2016).

Respecto al monitoreo de la calidad de agua del sistema de cultivo en condiciones hiperintensivas podemos observar una homogeneidad en los datos durante las 8 semanas de experimentación. García-Trejo (2013) sugiere una concentración de Oxígeno Disuelto (OD) para cultivo de tilapia en un intervalo de 3 a 4 mg/L como condiciones normales, lo que nos confirma el correcto control del OD en el cultivo. La concentración de Amonio es de los principales parámetros a monitorear ya que resulta tóxico para los organismos en concentraciones mayores a 1 mg/L. Haciendo un recambio de 10% de agua por hora en un cultivo con piletas de 500 L, Carvajal-Echeverri obtuvo en 2014 valores de 0.12 mg/L, que en comparación a los valores registrados en el Cuadro 4, se observan dos cifras sobre la concentración idónea, en

las semanas 1 y 2 se alcanzaron concentraciones hasta de 6 mg/L, esto debido a dos factores principalmente: la falta de cambio de agua, ya que al ser un sistema de recirculación con tres filtros integrados por los que el agua circulaba probablemente éstos no eran suficientes para la disminución de  $\text{NH}_4$ , por lo que se necesitaba hacer continuamente una limpieza y recambio de agua del sistema específicamente en estas semanas; otro factor fue la densidad de cultivo utilizada, se contaba con 20 individuos en cada pecera de 15 L que conforme iban aumentando de tamaño, aumentaba su excreta de Amonio haciendo vital el recambio de agua, es por eso que después de la semana 3 se obtuvieron concentraciones debajo de 1 mg/L.

La relación del peso con la longitud de los peces representa la condición en la que éstos se encuentran, es decir, indican la salud relativa del pez de acuerdo a sus factores ambientales en el momento de las mediciones (Olopade y col., 2018). Según Mancini (2002), la expresión más común para describir esta relación es:

$$W_{(i)} = a L_{(i)}^b$$

Donde el peso ( $W$ ) de un pez es aproximadamente igual a su volumen, y este último puede ser proporcional a su longitud ( $L$ ) al cubo ( $b$ ). Ajustando la ecuación a una forma lineal con ayuda de los logaritmos naturales se obtendría:

$$\text{Ln } W_{(i)} = \text{Ln } a + b * \text{Ln } L_{(i)}$$

Siendo  $b$  ahora la pendiente de la ecuación y conforme a la descripción anterior, se suele tomar  $b=3$  debido a que el crecimiento en longitud es proporcional al volumen, esto significa que el desarrollo del individuo es isométrico (proporcional entre ambos parámetros) y si  $b$  es diferente de 3 su crecimiento resulta alométrico (no proporcional).

En las Figuras 2 y 3 se muestran los gráficos obtenidos por regresión lineal ajustada a modelo multiplicativo, éste nos permite obtener los valores de  $a$  y  $b$  para predecir el peso de un organismo por medio del valor de su longitud. Debido a que la pendiente será el valor que determine la condición de las tilapias, en el Cuadro 5 se tiene la comparación de los valores de  $b$  obtenidos estadísticamente durante las 8

semanas de experimentación con el uso de las dos diferentes microalgas y el alimento comercial. En la semana de adaptación, la semana 0, se obtuvieron valores menores a 2 lo que nos indica una mala condición de salud en los peces debido a la falta de adaptación a las prácticas de manejo o al transporte de los peces hasta el lugar de experimentación. En la semana 1 se calcularon valores cercanos a 3 y con el alimento control incluso superiores representando una notable mejora en la salud de las tilapias y un crecimiento isométrico en estas. En las semanas posteriores se determinaron valores similares a 3 lo que nos indica si bien no un crecimiento isométrico, si un crecimiento estable durante toda la experimentación y sin diferencias significativas entre los valores.

La determinación del consumo de oxígeno y la excreta de amonio en los peces permite conocer el comportamiento de su metabolismo. En la Figura 4 se observa un comportamiento similar entre todos los tratamientos de suplemento de microalga *C. vulgaris* a diferentes porcentajes, sin embargo la mezcla 3 y el alimento comercial presentaron un mayor consumo de oxígeno lo que representa un estado de mayor estrés en los peces. A diferencia de éstos la mezcla 1 mantuvo un bajo consumo durante 24 horas demostrando un mejor estado de salud. Relacionando estas tendencias con las pendientes calculadas por la relación peso-longitud para conocer la condición de los organismos (Cuadro 6) la mezcla 3 resultó con  $m=2.7752$  siendo la mejor entre los diferentes suplementos de la especie *C. vulgaris*.

Por otro lado para las dietas suplementadas con *N. limnetica* se observan comportamientos variados entre tratamientos (Figura 5) siendo la mezcla 5 la de menor consumo y con respuestas diferentes a las 00:00 h y a las 10:00 h y obtenido una pendiente de 2.7458. Aunque la condición de los peces de acuerdo al valor obtenido por la relación peso-longitud no está alejado del valor ideal, el comportamiento metabólico de acuerdo al consumo de oxígeno no se expresa de la misma forma entre los tratamientos. La mezcla 4 presentó una pendiente con valor de 2.8107 demostrando un mejor estado de salud incluso sobre el alimento comercial ( $m=2.7917$ ) y con un consumo de oxígeno menor a éste, lo que indica que el suplemento de 5% de microalga *N. limnetica* mantiene un buen desarrollo en las



tilapias sin afectar su estado metabólico y resultando mejor que el suplemento de *C. vulgaris* a la alimentación de los peces.

De acuerdo con Zheng y colaboradores (2008) el amonio es el principal producto final del metabolismo del nitrógeno y los valores que se obtienen de la proporción Oxígeno consumido:Nitrógeno excretado (O:N ratio) pueden ser utilizados para determinar que sustrato es usado por el organismo en su actividad metabólica (proteína, lípidos o carbohidratos). Cuando los valores de O:N se encuentran entre 3 y 16 se trata del catabolismo de proteínas, entre 17 y 50 se refieren a la oxidación de mezcla de lípidos y proteínas, los valores que están entre 50 y 60 se relacionan con el catabolismo de proteínas-lípidos equivalentes y aquellos superiores a 60 están relacionados con la oxidación de carbohidratos (Mayzaud y Conover, 1988). En el Cuadro 7 se observan valores que implican el catabolismo de proteínas y de la mezcla de proteínas-lípidos en todos los tratamientos, incluso en el control, lo que nos demuestra que el uso de microalgas en la alimentación no presenta algún efecto negativo sobre el metabolismo. Entre las 00:00 y las 03:00 h se observa un aumento de  $\text{NH}_4$  en las dietas con *C. vulgaris* que se relaciona con el metabolismo de carbohidratos, lo que indica una condición de bajo estrés en los organismos.

La comparación del contenido calórico se determinó para conocer el aporte de energía que las dietas utilizadas pudieron proporcionar al organismo. Se sometieron los datos a un análisis de varianza con ayuda del software Statgraphics Centurion XV arrojando como resultado la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ) siendo las mezclas 3 y 6 las contrastantes. Relacionando los resultados con los análisis bromatológicos del Cuadro 3, observamos que las dietas suplementadas no presentaban gran divergencia en su contenido de nutrientes respecto al control, por lo tanto como se observa en la Figura 6, no se obtuvieron diferencias significativas en el contenido de calorías de las tilapias alimentadas con suplemento de microalgas respecto a los peces alimentados con alimento comercial.

El Cuadro 8 que muestra el porcentaje de proteína en las tilapias presenta un menor contenido en los individuos alimentados con hasta 15% suplemento de microalgas (mezclas 3 y 6) en relación al alimento control. Gbadamosi y Lupatsch (2018) obtuvieron mayor contenido de proteína en tilapias alimentadas con *N. salina* que con un alimento común a base de aceite de pescado. Fernandes-Corrêa y col. (2018) utilizaron una mezcla de aceites de plantas para sustituir el aceite de pescado en la alimentación de tilapias del Nilo obteniendo valores significativamente menores en la proteína corporal de aquellos individuos alimentados con aceites de diferentes plantas sobre el aceite de pescado. Finalmente adicionando 21% de *N. oculata* a la dieta de peces lisa, El-Dahhar y colaboradores reportaron en 2014 mayor contenido de proteína en el pez alimentado con suplemento de la microalga que su alimento control. Si bien las microalgas pueden considerarse una proteína vegetal que puede tener menor aporte que una proteína animal, los resultados obtenidos presentan un comportamiento semejante al adicionar a la alimentación ambos tipos de proteína.

El cálculo y comparación de los diferentes parámetros de producción permitieron evaluar la eficiencia y rendimiento de un cultivo de tilapia cuando se le realizó un cambio de alimentación a los peces. El porcentaje de supervivencia determinó la tolerancia que tuvieron los organismos ante las condiciones y cambio de alimentación de este experimento. Los valores que se muestran en el Cuadro 9 nos indican una buena adaptación al suplemento de microalgas por parte de las tilapias e incluso se observa mayor supervivencia que con alimento comercial, aunque factores como la calidad de agua en el cultivo también pudieron haber afectado estas cifras.

El-Sayed y col. en 2013 reemplazaron la proteína en forma de gluten en un alimento acuícola por una mezcla de algas (Algamaxx Independece Bioproducts) y *Spirulina* a 25, 50, 75 y 100% suministrándola a tilapias de aproximadamente 0.02 g. Reportaron una ganancia en peso de hasta 7517% cuando sustituyeron la proteína totalmente por Algamaxx al 25% y una Tasa Específica de Crecimiento (T.E.C.) de 5.62% con el mismo tratamiento, siendo superior que el alimento de referencia que utilizaron en los cuales obtuvieron 4767% y 5.04% respectivamente, concluyendo que se puede reemplazar hasta un 50% de la proteína de gluten por microalgas sin

obtener efectos negativos en el desarrollo de los peces. Comparando estos valores con los resultados de esta experimentación, aunque no se obtuvieron valores superiores al alimento control, las mezclas 3, 4 y 6 fueron las que resultaron con porcentajes más cercanos al alimento comercial con 4.46%, 4.27% y 4.17% respectivamente para la T.E.C. Las mezclas 3 y 6 fueron las de mayor porcentaje de suplemento de microalgas y presentaron valores más cercanos al alimento control. Respecto al peso ganado con el alimento control se obtuvo 1796.23% de ganancia que contrastado con el resto de las mezclas suplementadas, la mezcla 3 presentó el valor más próximo con 1115.34%, nuevamente siendo la de mayor porcentaje de suplemento de *C. vulgaris* la que se acercó a la referencia y confirmando lo propuesto por El-Sayed y col. (2013).

Los valores obtenidos del alimento consumido por individuo (g/día) se observan iguales para todos los tratamientos en este experimento, esto puede significar que hubo una buena aceptación del alimento por parte de *O. niloticus*, es decir que se puede reemplazar hasta un 15% de los componentes de un alimento comercial con biomasa microalgal sin tener efectos en la palatabilidad de éste. Según lo reportado por Gbadamosi y Lupatsch (2018), tilapias del Nilo de aproximadamente 12.70g lograron aceptar sin dificultad la inclusión de *Nannochloropsis salina* en su dieta conformando el 35% de proteína cruda y obteniendo rendimientos de crecimiento favorables comparados con alimentos a base de aceite de pescado y aceite de soya.

La digestibilidad del alimento es muy importante para el buen desarrollo de un organismo, ya que de ello dependerá la obtención de nutrientes y la disponibilidad de estos para que logren convertirse en energía. La Tasa de Conversión Alimenticia (T.C.A.) nos permite conocer con que eficiencia el alimento es transformado en biomasa para el pez, los valores más bajos representan alta efectividad de conversión, por lo tanto las dietas suplementadas con *N. limnetica* resultaron ser mejor digeribles y proporcionaron mayor energía que el control. El-Dahhar y col. (2014) evaluaron el efecto que tenía utilizar *N. oculata* en la alimentación del pez lisa (*Liza Ramada*) en diferentes concentraciones obteniendo el mejor valor de T.C.A. con el suplemento de 21% de esta especie de microalga.

Debido a que las microalgas son una fuente importante de proteína, calcular la Relación de Eficiencia Proteica (P.E.R.) nos involucrará el peso ganado en los peces de acuerdo a la proteína consumida (g/día). Aunque ambas especies de microalgas presentaron mayor contenido de proteína en los análisis proximales realizados, observamos que los valores de P.E.R. calculados fueron menores que en el alimento control. Las mezclas 2 y 3, que pertenecen al suplemento 10 y 15% respectivamente de *C. vulgaris* fueron las más cercanas al alimento comercial. La biodisponibilidad de la proteína para los peces puede ser uno de los factores por los cuales su ingesta no pudo ser del todo utilizada por los organismos ya que las microalgas cuentan con una pared celular bastante rígida lo que representa un obstáculo para su digestión (Tibbetts y col., 2017). Por otro lado el balance de aminoácidos proporcionado por las microalgas puede no ser el adecuado para los requerimientos de *O. niloticus*, pudiendo verificarse llevando a cabo un perfil de aminoácidos para conocer aquellos que integran a las especies de microalga utilizadas para este experimento y saber si son suficientes para el desarrollo de las tilapias. Gbadamosi y Lupatsch calcularon en 2018 la retención de proteína utilizando *N. salina* en tilapias sin obtener diferencias significativas entre tratamientos, lo cual difiere en los resultados reportados en esta experimentación.

R. de Cruz y col. (2018) reportaron que se puede reemplazar hasta un 15% de proteína cruda en alimentos comerciales o de referencia por diferentes productos de microalgas sin afectar el crecimiento del pez lubina rayada (*Morone sp.*), que comparados con los parámetros productivos aquí descritos efectivamente puede suplementarse hasta un 15% de *C. vulgaris* y/o *N. limnetica* a la alimentación de tilapias del Nilo en etapa juvenil sin comprometer su desarrollo bajo cultivo hiperintensivo.

## 7. CONCLUSIONES

Las microalgas son una potencial fuente para la alimentación acuícola ya que gracias a su diversidad de componentes, que a su vez logran ser proporcionados a los organismos que las consumen, otorgan una mayor cantidad de beneficios para el desarrollo de éstos.

La especie *Oreochromis niloticus* variedad supermacho presentó un crecimiento en peso y talla adecuado cuando fue alimentada con microalgas como suplemento, incluso mostrando un desarrollo similar al control, siendo entonces una buena opción para el enriquecimiento de su dieta. Así mismo, los peces presentaron una salud relativa similar entre los diferentes alimentos proporcionados y se observó un menor estado de estrés en aquellos a los que se les suministró suplemento de la especie *Chlorella vulgaris*.

Aunque no se obtuvieron parámetros productivos superiores en un cultivo de tilapia hiperintensivo cuando se utilizó un alimento comercial, *Chlorella vulgaris* y *Nannochloropsis limnetica* lograron generar cifras similares cuando fueron utilizadas como aditamento para la alimentación de *O. niloticus*. Los peces alimentados con suplemento de la especie *N. limnetica* presentaron un mejor rendimiento haciendo posible la adición de hasta 10% de microalga sin afectar su crecimiento y fisiología.

## 8. REFERENCIAS

- Benemann** JR. Microalgae aquaculture feeds. *Applied Phycology* **1992**; vol. 4:233-245.
- Brown** MR. Nutritional value and use of microalgae in aquaculture. In: Cruz-Suárez LE, et al., editors, *Avances en nutrición acuícola VI. Memorias del VI Simposium Internacional de Nutrición Acuícola*. Cancún, Quintana Roo, México; **2002**.
- Carvajal-Echeverri** JP. Comparación de Parámetros zootécnicos y de calidad de agua de tres sistemas de precría de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) en el Municipio de Puerto Triunfo. Tesis de Licenciatura. **2014**. Universidad Lasallista. Caldas, Antioquía.
- El-Dahhar** AA, Salama ME, Moustafa YT, Elmorshedy EM. Effect of using Algae (*Nannochloropsis Oculata*) in Grey Mullet (*Liza Ramada*) Larval Diets on Growth Performance and Feed Utilization. *Journal of the Arabian Aquaculture Society*. **2014**; vol. 9:131-144.
- El-Sayed** E, Dabrowski K, El-Saidy D, Lee BJ. Enhancing the growth of Nile tilapia larvae/juveniles by replacing plant (gluten) protein with algae protein. *Aquaculture Research*. **2013**; vol. 44: 937-949.
- FAO**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of World Fisheries and Aquaculture*. Rome. **2012**; 231.
- FAO**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all*. Rome. **2016**; 200.
- Fernandes-Corrêa** C, Oselame-Nobrega R, Mara-Block J, Machado-Fracalossi D. Mixes of plant oils as fish oil substitutes for Nile tilapia at optimal and cold suboptimal temperature. *Journal of Aquaculture*. **2018**; vol. 497:82-90.
- Freire** I, Cortina-Burgueño A, Grille P, Arizcun-Arizcun M, Abellán E, Segura M, Witt Sousa F, Otero A. *Nannochloropsis limnetica*: A freshwater microalga for marine aquaculture. *Journal of Aquaculture*. **2016**; vol. 459:124-130.
- García-Trejo** JF. Balance de materia y energía en un cultivo acuapónico (tilapia-lechuga). Tesis de Doctorado. **2013**. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.

**Gbadamosi** OK, Lupatsch I. Effects of dietary *Nannochloropsis salina* on the nutritional performance and fatty acid profile of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Algal Research. **2018**; vol. 33:48-54.

**Gómez-Jacinto** V. Estudio de elementos esenciales y tóxicos en microalgas: uso de *Chlorella sorokiniana* en la preparación de alimentos funcionales. Tesis de Doctorado. **2015**. Universidad de Huelva. Huelva, España.

**Krienitz** L, Wirth M. The high content of polyunsaturated fatty acids in *Nannochloropsis limnetica* (Eustigmatophyceae) and its implication for food web interactions, freshwater aquaculture and biotechnology. Journal of Limnologia. **2006**; vol. 36:204-210.

**Mancini** MA. Introducción a la biología de los peces. FAV UNRC [serie en internet] **2002** [consultado 2018 septiembre 3]; 1:1-19. Disponible en: [www.produccion-animal.com.ar](http://www.produccion-animal.com.ar)

**Mayzaud** P, Conover RJ. O:N atomic ratio as a tool to describe zooplankton metabolism. Marine Ecology-Progress Series. **1988**; vol. 45:289-302.

**Montero-Rodríguez** M. National Aquaculture Sector Overview-Mexico. FAO. Rome. **2013**.

**Nadarajah** S, Flaaten O. Global aquaculture growth and institutional quality. Marine Policy. **2017**; vol. 84:142-151.

**Olopade** OA, Dienye HE, Jimba B, Bamidele NA, Taiwo IO. Length–Weight Relationship and Condition Factor of Guinean Tilapia *Coptodon guineensis* (Günther, 1862) from the New Calabar River and Buguma Creek, Nigeria. Punjab University Journal of Zoology. **2018**; vol. 33:42-46.

**Platas-Rosado** D, Vilaboa-Arroniz J. La acuicultura mexicana: potencialidad, retos y áreas de oportunidad. Revista Mexicana De Agronegocios. **2014**; vol. 35.

**Poot-López** GR, Hernández JM, Gasca-Leyva E. Analysis of ration size in Nile tilapia production: Economics and environmental implications. Journal of Aquaculture **2013**; 420-421:198-205.

**Rakocy** JE. Cultured Aquatic Species Information Programme *Oreochromis niloticus*. Departamento de pesca y acuicultura de la FAO. Rome. **2005**.

**R de Cruz C**, Lubrano A, Gatlin III DM. Evaluation of microalgae concentrates as partial fishmeal replacements for hybrid striped bass *Morone sp.* Journal of Aquaculture. **2018**; vol. 493: 130-136.

**Roriz GD**, et al. Characterization of tilapia farming in net cages at a tropical reservoir in Brazil. Aquaculture Reports. **2017**; vol. 6:43-48.

**Sathasivam R**, Radhakrishnan R, Hashem A, Abd Allah E. Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. Saudi Journal of Biological Sciences. **2017**.

**Skov PV**, Duodu CP, Adjei-Boateng D. The influence of ration size on energetics and nitrogen retention in tilapia (*Oreochromis niloticus*). Journal of Aquaculture **2017**; vol. 473:121-127.

**Taelman SE**, De Meester S, Roef L, Michiels M, Dewulf J. The environmental sustainability of microalgae as feed for aquaculture: A life cycle perspective. Bioresource Technology. **2013**; vol. 150:513-522.

**Tibbetts SM**, Mann J, Dumas A. Apparent digestibility of nutrients, energy, essential amino acids and fatty acids of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar L.*) diets containing whole-cell or cell-ruptured *Chlorella vulgaris* meals at five dietary inclusion levels. Journal of Aquaculture. **2017**; vol. 481:25-39.

**Xie D**, Yang L, Yu R, Chen F, Lu R, Qin C, Nie G. Effects of dietary carbohydrate and lipid levels on growth and hepatic lipid deposition of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Journal of Aquaculture. **2017**; vol. 479:696-703.

**Zheng Z**, Jin C, Li M, Bai P, Dong S. Effects of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile miiuy croaker, *Miichthys miiuy* (Basilewsky). Aquaculture International. **2008**; vol. 16:581-589.