

Evaluation of the intensive production of juvenile tilapia under greenhouse conditions: Profitability analysis and aspects of its applicability

Evaluación de la producción intensiva de juveniles de tilapia en invernadero: Análisis de rentabilidad y aspectos de su aplicabilidad

Gutiérrez-Leyva, R.^{1*}, Ulloa, J. A.¹, Ramírez-Ramírez, J. C.¹, Bautista-Rosales, P. U.¹, Rosas-Ulloa, P.¹, Silva-Carrillo, Y.¹, Ramírez-Acevedo, E. A.², Camarena-Herrera, M. E.³

¹Cuerpo Académico de Tecnología de Alimentos. Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura "Amado Nervo", Tepic, Nayarit, México. C.P. 63155.

²Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias. Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela Km 9, Xalisco, Nayarit, México. C.P. 63780.

³Universidad del Valle de Matatipac. Avenida de la Cultura No. 30. Fraccionamiento Ciudad del Valle, Tepic, Nayarit, México. C.P. 63155.

Cite this paper/Como citar este artículo: Gutiérrez-Leyva, R., Ulloa, J. A., Ramírez-Ramírez, J. C., Bautista-Rosales, P. U., Rosas-Ulloa, P., Silva-Carrillo, Y., Ramírez-Acevedo, E. A., Camarena-Herrera, M. E. (2020). Evaluation of the intensive production of juvenile tilapia under greenhouse conditions: Profitability analysis and aspects of its applicability. *Revista Bio Ciencias* 7, e584. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e584>



ABSTRACT

Fish feed represents between 50 % and 70 % of the production costs of intensive aquaculture. In this context, we present the results of a study carried out to determine the profitability of Nile tilapia production under greenhouse conditions based on the results of a growth bioassay conducted with tilapia under two feeding conditions in which the optimal growth rate was determined according to the quality of the diet. In second instance, the benefit/cost ratio of three feeding strategies with high and low protein diets; 1H:1L (strategy A), 2H:1L (strategy B) and 3H:2L (strategy C) was evaluated to determine annual production costs when producing juveniles of 150 g using 6 continuous production periods of 53.5 days under intensive greenhouse conditions.

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: October 15th 2018.

Accepted/Aceptado: November 7th 2019.

Available on line/Publicado: November 8th 2019.

RESUMEN

El alimento representa entre un 50 % y 70 % de los costos de producción de la acuicultura intensiva. En este contexto, presentamos los resultados de un estudio realizado para determinar la rentabilidad de la producción de juveniles de tilapia nilótica en condiciones de invernadero basándonos en los resultados de un bioensayo de crecimiento conducido con tilapia mediante dos condiciones de alimentación en las cuales se determinó la tasa de crecimiento óptima en función de la calidad de la dieta. En segunda instancia se evaluó la relación beneficio/costo de tres estrategias de alimentación con dietas altas y bajas en proteína; 1H:1L (estrategia A), 2H:1L (estrategia B) y 3H:2L (estrategia C) para determinar los costos de producción anuales al producir juveniles de 150 g utilizando 6 periodos continuos de producción de 53.5 días en condiciones intensivas de invernadero. El bioensayo de crecimiento tuvo una duración de 45 días con tilapia nilótica (9.6 g) en el cual se evaluaron 4 dietas con niveles de P/E de 18, 19, 20 y 21 kg/MJ con un modelo de alimentación a saciedad aparente (alimentación diaria al 100 %) y las

*Corresponding Author:

Ranferi, Gutiérrez-Leyva. Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Carretera Chapalilla-Compostela km 3.5, Compostela, Nayarit, México. C.P. 63700. Phone: +52(327) 1151 832. E-mail: granferi@hotmail.com

The growth trial lasted 45 days with Nile tilapia (9.6 g) in which 4 diets were evaluated with P/E levels of 18, 19, 20 and 21 kg/MJ with an apparent satiety feeding model (100 % daily feed intake) and the same diets with a 30 % restriction feeding model (70 % daily feed intake). The results of the experiment indicate that the diet with a P/E ratio of 18 kg/MJ supplied with a 30 % restriction improved feed consumption and the use of protein for growth ($p < 0.05$). The profitability analysis determined that the feeding strategy (3H:2L) obtained the best benefit/cost ratio (1.11) and that this condition, once evaluated for 5 years under scenarios of increases in the cost of feed and in the sale price of the product, allowed obtaining increases in the benefit/cost ratio comparable to the performance of the baseline (initial production condition) in values of 1.2-1.4, however, the net present value under these conditions presents a downward trend. In conclusion, the profitability analysis was positive for the evaluation of the project after five-year period of production in terms of the benefit/cost ratio, besides obtained results varied depending on the quality of the diet and on the conditions of the analyzed productive system. Therefore, the usefulness of this modeling could be feasible to produce juveniles of commercial tilapia lines with an average weight of 150 g.

KEY WORDS

Tilapia, growth, protein sparing, profitability analysis, benefit/cost ratio, net present value.

Introduction

Aquaculture is a fast-growing sector with a worldwide fish production of 80 MT in 2016, which represents 88 % with regard to worldwide fisheries production, calculated to be 90.9 MT for the same year (FAO, 2018). Tilapia is a popular fish in the world freshwater aquaculture with 126 reported countries or regions, in which a production of 5.7 MT was recorded in 2015, according to data from FAO (2016). A relevant goal to keep this sector constantly growing involves developing new researches aiming to determine the benefits of using different feeding strategies, and how these strategies influence economic and productive parameters (Gutiérrez *et al.*, 2015; Janssen *et al.*, 2017).

mismas dietas con un modelo de alimentación con restricción del 30 % (alimentación diaria al 70 %). Los resultados del experimento indicaron que la dieta con relación P/E de 18 kg/MJ suministrada con una restricción del 30 %, mejoró el consumo de alimento y la utilización de proteína para crecimiento ($p < 0.05$). El análisis de rentabilidad determinó que la estrategia de alimentación (3H:2L) obtuvo la mejor relación beneficio/costo (1.11) y que esta condición al ser evaluada durante un periodo de 5 años bajo escenarios de incrementos en el costo del alimento y en el precio de venta del producto permite obtener incrementos de la relación beneficio/costo comparables al rendimiento de la línea base (condición inicial de producción) en valores de 1.2-1.4; sin embargo, el valor actual neto bajo estas condiciones presenta una tendencia a la baja. En conclusión el análisis de rentabilidad es positivo para la evaluación del proyecto al final de un periodo de 5 años de producción en términos de la relación beneficio/costo, además, los resultados obtenidos varían en función de la calidad de la dieta y de las condiciones del sistema productivo analizadas. Por lo tanto, la utilidad de este modelado podría ser factible para producir juveniles de líneas comerciales de tilapia con un peso promedio de 150 g.

PALABRAS CLAVE

Tilapia, crecimiento, ahorro de proteína, análisis de rentabilidad, relación beneficio/costo, valor actual neto.

Introducción

La acuicultura es un sector de rápido crecimiento con una producción mundial de peces en 2016 de 80 MT, lo cual representa el 88 % respecto al aporte de las pesquerías mundiales que se calcularon en 90.9 MT para este mismo año (FAO, 2018). La tilapia es un pez popular en la acuicultura mundial de agua dulce con 126 países o regiones reportadas, de las cuales en 2015 se registró una producción de 5.7 MT según datos de la FAO (2016). Una meta relevante para mantener este sector en constante crecimiento implica el desarrollo de nuevas investigaciones centradas en determinar el beneficio de utilizar diferentes estrategias de alimentación, y como estas influyen en los parámetros económicos y productivos (Gutiérrez *et al.*, 2015; Janssen *et al.*, 2017).

Las tilapias son organismos con requerimientos proteínicos de cadenas tróficas inferiores y hábitos alimenticios que tienden al herbivorismo (Montoya-Camacho *et al.*, 2018), sin embargo, los modelos intensivos de cultivo de tilapia en

Tilapia are organisms with protein requirements from inferior food chains and feeding habits that tend to be herbivorous (Montoya-Camacho *et al.*, 2018), nevertheless, intensive rearing models of tilapia in close systems require protein/energy levels between 18 and 23 kg/MJ for maintaining an optimum growth at first stages, according to Kabir *et al.* (2018). Nitrogen-balance studies of reared tilapia in tanks suggested that the productivity of the food web is increased when reducing the P/E ratio in the diet below the optimum levels reported in literature. This situation has given rise to the study of the effect of P/E proportion in balanced feeds with high and low lipid levels on growth as well as on the use of nutrients. In that regard, research works realized by El-Sayed & Teshima (1992), Swellum *et al.* (2005) and Kaushik *et al.* (1995) where the published data indicated that the nitrogen maximum gain is 12 g/kg/day, corresponding to a level of maintenance protein of 2 g/kg/day with a DP/DE ratio of 18 mg/kJ. Based on these background data, the specific objective of this study was to determine the effect of different dietary P/E levels on protein sparing for *Oreochromis niloticus* juveniles growth in controlled conditions.

In aquaculture, values of production economical profitability are available only for a few species of commercial interest, mainly for marine species. Econometric equations used for obtaining profitability studies in Nile tilapia are founded on indicators that do not contemplate the analysis of elevated levels in the discount rate and their effects on the net present value (NPV) by means of probabilistic models of sensitivity. For this, the second objective of this research focused on performing a profitability analysis of Nile tilapia rearing using different feeding strategies and different scenarios of evaluation of the cost/benefit ratio and the NPV. Integrating analytic criteria proposed by Janseen *et al.* (2017) to the model in the biological variables and criteria developed by Perea-Román *et al.* (2018) and also those developed by Phiri & Yuan (2018) in the indexes of economical profitability and in the sensibility coefficients determined in this modeling with tilapia.

The development of new policies in worldwide aquaculture has clear objectives for the economic development, employment and protection of the environment by applying new models of production focused on species of high commercial demand and low production costs. Tilapia is the second most cultivated fish worldwide, therefore, in order to increase production, innovative methods are required for integrating the rearing and minimizing the

sistemas cerrados requieren niveles de Proteína/Energía entre 18 y 23 kg/MJ para mantener un óptimo crecimiento en las primeras etapas de acuerdo con Kabir *et al.* (2018). Los estudios sobre balance de nitrógeno en tilapia cultivada a nivel de estanque sugieren que la productividad de la red alimentaria se incrementa al reducir la relación P/E en la dieta por debajo de los niveles óptimos reportados en la literatura. Esta situación ha propiciado el estudio de la proporción P/E en alimentos balanceados con altos y bajos niveles de lípidos a nivel de crecimiento así como su efecto en la utilización de nutrientes. Al respecto destacan las investigaciones de El-Sayed & Teshima (1992), Swellum *et al.* (2005) y Kaushik *et al.* (1995), donde los datos publicados indican que la ganancia máxima de Nitrógeno es de 12 g/kg/día y que esto corresponde a un nivel de proteína de mantenimiento de 2 g/kg/día con una relación DP/DE de 18 mg/kJ. En base a estos antecedentes, el objetivo específico de este estudio fue determinar el efecto de diferentes niveles de P/E en la dieta sobre el ahorro de proteína para crecimiento de juveniles de *Oreochromis niloticus* en condiciones controladas.

En acuicultura los valores de rentabilidad económicos de producción están disponibles solo para unas pocas especies de interés comercial principalmente de cultivo en ambientes marinos. Las ecuaciones econométricas que se han utilizado para obtener estudios de rentabilidad en la tilapia del Nilo están fundamentadas en indicadores que no contemplan analizar niveles elevados en la tasa de descuento y sus efectos sobre el valor actual neto (NPV) mediante modelos probabilísticos de sensibilidad. Por lo que el segundo objetivo de esta investigación se enfocó en realizar un análisis de rentabilidad del cultivo de tilapia nilótica utilizando diferentes estrategias de alimentación y diferentes escenarios de evaluación de la relación beneficio/costo y el NPV. Integrando al modelo los criterios analíticos propuestos por Janssen *et al.* (2017) en las variables biológicas y los criterios desarrollados por Perea-Román *et al.* (2018), así como también los de Phiri & Yuan (2018) en los índices de rentabilidad económica y en los coeficientes de sensibilidad determinados en este modelado con tilapia.

El desarrollo de nuevas políticas en acuicultura a nivel mundial claramente tiene objetivos de desarrollo económico, empleo y protección del ambiente mediante la aplicación de nuevos modelos de producción enfocados en especies de alta demanda comercial y bajos costos de producción. La tilapia es el segundo pez más cultivado en el mundo, por lo tanto, para aumentar la producción se requerirán métodos novedosos para integrar el cultivo y minimizar la contaminación derivada del metabolismo de los peces (Watanabe *et al.*, 2002). Los análisis económicos acoplados a modelos productivos con

pollution caused by fish metabolism (Watanabe *et al.*, 2002). Economic analyses coupled to productive models with environmental implications are used for identifying better strategies of productive handling that are technical, economic, and ecologically efficient in production systems in which issues like fixed price and the size of harvests have to be solved (Kaliba *et al.*, 2006; Poot-Lopez *et al.*, 2014). The production systems of Nilotic tilapia in greenhouse conditions have been addressed through economic modeling in the following researches: By Lutz & Kenneth (1998) for a production system in 4 months-periods with offsprings with a initial weight of 4.5 g; by Nasr-Allah *et al.* (2014) for the production of fingerlings; and by Poot-Lopez *et al.* (2014) in an analysis of ration size with regards to harvest size with inanition and satiety periods. However, this is the first study of our knowledge in which a model of production in greenhouse is being integrated for the production of only juvenile fish with an average harvest weight of 150 g, using different feeding strategies, which were validated in the research work with Nile tilapia performed by Bolivar *et al.* (2006), using as feeding model a regimen of alternating days *versus* a daily model, as well as in the work of Adewolu & Adoti (2010) who validated different feeding schemes with high, medium, and low levels of mixed protein on the growth and food utilization in African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*). The general objective of this research was to determine the profitability of Nile tilapia juveniles rearing in greenhouse by utilizing different production scenarios in the modeling.

Material and Methods

The graphic summary of the evaluation model used for defining the profitability analysis in the intensive production of tilapia juveniles is described in Figure 1.

Development of diets and experimental organisms

The raw material used in this study was a batch of macro-ingredients that was formed by fish meals, soybean pasta meals, wheat meal and by dry moringa leaves pulverized in a Wiley mill model 4. For its proximal analysis the macro ingredients were sieved at 0.5 mm. In addition, as an energy source, fish oil and safflower oil were used, and as a supplement a commercial vitamin and mineral premixes. For the growth bioassay, four diets were formulated with P/E ratios of 18, 19, 20 and 21 kg/MJ

implicaciones ambientales se utilizan para identificar mejores estrategias de manejo productivo que sean eficientes en forma técnica, económica y ecológica en sistemas de producción en los cuales se tienen que resolver problemas como el precio fijo y el tamaño de cosecha (Kaliba *et al.*, 2006; Poot-López *et al.*, 2014). Los sistemas de producción de tilapia nilótica en condiciones de invernadero han sido abordados mediante modelados económicos en las siguientes investigaciones, realizadas por Lutz & Kenneth (1998) para un sistema de producción en periodos de 4 meses con crías de peso inicial de 4.5 g; por Nasr-Allah *et al.* (2014) para la producción de alevines; y por Poot-López *et al.* (2014) en un análisis del tamaño de la ración respecto al tamaño de cosecha con periodos de inanición y saciedad. Sin embargo, este es el primer estudio hasta nuestro conocimiento en los cuales se está integrando un modelo de producción en invernadero para producción de solo peces juveniles con un peso promedio de cosecha de 150 g utilizando diferentes estrategias de alimentación, las cuales fueron validadas en el trabajo de investigación con tilapia nilótica de Bolivar *et al.* (2006) utilizando como modelo de alimentación un régimen de días alternados *versus* un modelo diario, también en el trabajo de Adewolu & Adoti (2010) quienes validaron diferentes esquemas de alimentación con niveles de proteína mixtos altos, medios y bajos sobre el crecimiento y la utilización del alimento en el pez gato africano (*Clarias gariepinus*). El objetivo general de esta investigación fue determinar la rentabilidad del cultivo de juveniles de tilapia nilótica en invernadero utilizando en el modelado diferentes escenarios de producción.

Material y Métodos

El resumen grafico del modelo de evaluación utilizado para definir el análisis de rentabilidad en la producción intensiva de juveniles de tilapia se describe en la Figura 1.

Desarrollo de dietas y organismos experimentales

La materia prima utilizada fue un lote de macro ingredientes que estuvo formado por harinas de pescado, harina de pasta de soya, harina de trigo y a su vez por hojas secas de moringa pulverizadas en un molino Wiley modelo 4. Para su análisis proximal los macro ingredientes fueron tamizados a 0.5 mm. Además como fuentes energéticas se dispuso de aceite de pescado, aceite de cártamo, y como suplemento una premezcla comercial de vitaminas y minerales. Para el bioensayo de crecimiento mediante el software Nutrion-Pro se formularon cuatro dietas con una relación P/E de 18, 19,

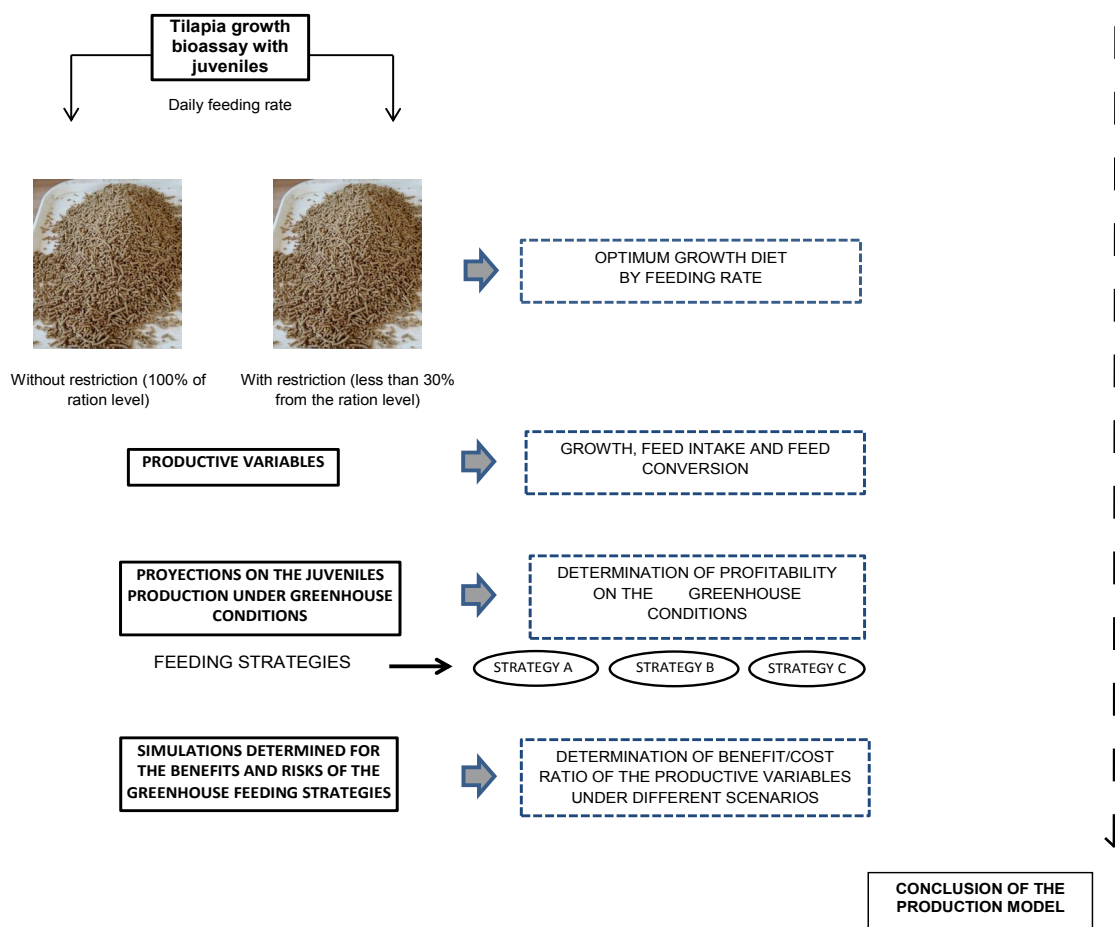


Figure 1. Conceptual model used to define the profitability analysis the intensive production of juvenile tilapia under greenhouse conditions (photograph from the feed pilot-plant of Academic Unit of Veterinary Medicine and Zootechnics, Autonomous University of Nayarit).

Figura 1. Modelo conceptual utilizado para definir el análisis de rentabilidad en la producción intensiva de juveniles de tilapia en invernadero (fotografía proveniente de la planta piloto de alimentos de la Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit).

by means of the software Nutrión-Pro, using lipid content as a main variation factor and maintaining a fixed protein level of 40 % (Table 1) based on the requirements for *O. niloticus* described by Diogenes *et al.* (2016). Diets were manufactured with the method described by Gutiérrez *et al.* (2015), for which the resulting mass of the mixture of ingredients with 30 % water (weight/volume) was passed twice through a meat mill of 0.75 HP Harbor Beef Model G12 that had a two-millimeter die coupled at the end of the

20 y 21 kg/MJ utilizando como principal factor de variación el contenido de lípidos manteniendo un nivel de proteína fijo de 40 % (Tabla 1) en base a los requerimientos para *O. niloticus* descritos por Diogenes *et al.* (2016). Las dietas se fabricaron con el método descrito por Gutiérrez *et al.* (2015), para lo cual la mezcla de ingredientes resultante con 30 % de agua (peso/volumen) se pasó dos veces por un molino de carne de 0.75 HP Marca Harbor Beef Modelo G12 que tenía acoplado un dado de salida de 2 mm de diámetro al final del tornillo, posteriormente

Table 1.
Chemical and energetic composition of the experimental diets used in the growth trial with juvenile Nile tilapia.

Tabla 1.
Composición química y energética de las dietas experimentales utilizadas en el bioensayo de crecimiento con juveniles de tilapia Nilótica.

Ingredients on wet basis (g/kg)	Experimental diets			
	D8	D12	D16	D20
Wheat flour ¹	316.7	265.9	241.1	200.0
Sardine fishmeal ²	225.0	225.0	225.0	225.0
Squid meal ²	145.2	155.1	160.0	168.0
Extracted soybean meal ¹	130.0	130.0	130.0	130.0
Corn starch flour ³	50.0	50.0	29.2	21.5
Moringa leaves flour ⁴	50.0	50.0	50.0	50.0
Salmon oil ²	30.0	50.0	70.0	90.0
Carrageenan ⁵ (binder)	20.0	20.0	20.0	20.0
Premix of vitamins and minerals ⁶	20.0	20.0	20.0	20.0
Safflower oil ⁷	13.0	33.9	54.6	75.4
Tocopherol 400 UI ⁸ (lipid preserver)	0.10	0.10	0.10	0.10
Total sum of ingredients (g)	1000	1000	1000	1000
Chemical composition and energy content (dry basis; mean ± ED).				
Crude protein (g/kg) ⁹	400.2±8.1	401.9±0.1	402.3±2.2	399.9±1.8
Dry matter (g/kg) ¹⁰	938.5±1.8	943.6±0.7	984.4±0.3	983.2±0.1
Crude fiber (g/kg) [*]	27.5	27.5	27.5	27.6
Ash (g/kg) ¹¹	60.5±2.1	67.9±0.1	68.6±0.4	79.8±17.5
Nitrogen-free extract (g/kg)	359.3	319.7	313.6	260.8
Ethereal extract (g/kg) ¹²	91.1±2.3	126.7±2.1	172.4±4.6	215.1±0.5
Gross energy MJ/kg ¹³	19.29±0.08	20.25±0.02	21.14±0.08	22.16±0.02
Protein/energy ratio (kg/MJ)	21	20	19	18

*Theoretical value of Nutrión formulations.

Suppliers of Mexico and equipment used in laboratory analysis:

¹Semillas Socorrito Tepic, Nayarit, México.

²Proteínas Marinas y Agropecuarias S.A. de C.V. Guadalajara, Jalisco, México.

³Maizena UNILEVER México, Tultitlán, Estado de México, México.

⁴Academic Unit of Veterinary Medicine and Zootechnics, Compostela, Nayarit, México.

⁵DGari Procesa Alimentos S.A. de C.V. Querétaro, México.

⁶VITAFORTE-A® PARFARM, S.A. México, D.F.

⁷Aceites Grasas y Derivados S.A. de C.V. Zapopan, Jalisco, México.

⁸Bayer de México S.A. de C.V.

⁹Gerhardt-DUMATHERM DT N40 analyzer (Gerhardt GmbH Co. Königswinter, Germany).

¹⁰TerLab Mod. MA12D stove (TerLab S.A. de C.V., Jalisco, México).

¹¹NOVATECH Mod. EI35-EA muffle (DICLAB A.C. Tlaquepaque, Jalisco, México).

¹²Fat extraction equipment LABCONCO (LABCONCO Co. Kansas City, MO, USA).

¹³IKA C6000 isoperibolic calorimeter (IKA Inc. Wilmington, NC, USA).

*Valor teórico de las formulaciones del Nutrión.

Abastecedores de insumos de México y equipos utilizados en análisis de laboratorio:

¹Semillas Socorrito Tepic, Nayarit, México.

²Proteínas Marinas y Agropecuarias S.A. de C.V. Guadalajara, Jalisco, México.

³Maizena UNILEVER México, Tultitlán, Estado de México, México.

⁴Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Compostela, Nayarit, México.

⁵DGari Procesa Alimentos S.A. de C.V. Querétaro, México.

⁶VITAFORTE-A® PARFARM, S.A. México, D.F.

⁷Aceites Grasas y Derivados S.A. de C.V. Zapopan, Jalisco, México.

⁸Bayer de México S.A. de C.V.

⁹Analizador Gerhardt-DUMATHERM DT N40 (Gerhardt GmbH Co. Königswinter, Germany).

¹⁰Estufa TerLab Mod. MA12D (TerLab S.A. de C.V., Jalisco, México).

¹¹Muffla NOVATECH Mod. EI35-EA (DICLAB A.C. Tlaquepaque, Jalisco, México).

¹²Equipo de extracción de grasa LABCONCO (LABCONCO Co. Kansas City, MO, USA).

¹³Calorímetro isoperibólico IKA C6000 (IKA Inc. Wilmington, NC, USA).

screw, later, the feed was dried in a stove with air flow for 24 h at 40 °C, once dried, the diets were sieved in order to remove fine particles and uniform pellets were stored at 18 °C until their use. A batch of commercial hormoned Nile tilapia fingerlings was obtained from the company Agro-Acuícola El Ventarrón SPR de RL from Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, Mexico, which were acclimated in 12 m³-tanks for 30 days under experimental conditions of water quality and fed with a commercial diet of initiation from NutriPec brand with 40 % protein and 12 % lipids (Agribands-Purina, Mexico) until achieving the adequate experimental weight.

Proximal and energy analyses of the diets

Samples of meals as ingredients, and diets were finely ground and analyzed in its proximal chemical composition of raw protein (Nitrogen x 6.25), ethereal extract (lipids), moisture, ash and crude fiber with standardized methods by AOAC (2006) in the laboratory of bromatological analyses of the Academic Unit of Veterinary Medicine and Zootechnics of the Autonomous University of Nayarit. Next, raw energy content was determined by means of an isopellicoric calorimeter. Nitrogen-free extract was calculated from the proximal composition as % NFE = 100 – (% protein + % ethereal extract + % ash + % moisture + % crude fiber).

Growth bioassay

The experimental system consisted in 24 tanks of 1200-L connected to a closed water recirculation system coupled to a bio-filter previously conditioned with nitrogen-fixing bacteria BioPro® Nitrobacter (Hobby Pet, Monterrey, Nuevo León, México) for treating the residual water from the tanks with a water renewal rate of approximately 360 % for 24 h. In the bioassay, juveniles (initial weight 9.6 ± 0.2 g) were assessed during 45 days in controlled conditions of temperature (27 ± 2 °C), dissolved oxygen (>6 mg/L) and photoperiod (12 h light: 12 h darkness), at a rearing density of 10 tilapia/tank. Three diets were supplied in a design with apparent satiety feeding (control diets), and three diets with a feeding strategy with a restriction of 30 % compared to the consumption of the control treatment in an experimental design randomized in triplicate. During the bioassay, biometrics were performed on days 0, 15, 30, and 45 after a 24 h period without feeding in order to standardize the weight of the animals. Water quality parameters as dissolved oxygen and temperature were measured once a day at 8.00 am using an oximeter

el alimento fue secado en estufa con flujo de aire por 24 h a 40 °C y una vez secas las dietas se tamizaron para eliminar las partículas finas y los pellets uniformes fueron almacenados a 18 °C hasta su uso. Se obtuvo un lote de alevines comerciales hormonados de tilapia nilótica provenientes de la empresa Agro-Acuícola El Ventarrón SPR de RL de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México, los cuales fueron aclimatados en tanques de 12 m³ por 30 días a condiciones experimentales de calidad del agua y alimentados con una dieta comercial de iniciación marca NutriPec con 40 % proteína y 12 % de lípidos (Agribands-Purina, México) hasta registrar el peso adecuado experimental.

Análisis proximal y de energía de las dietas

Muestras de los ingredientes en forma de harina, y las dietas experimentales fueron finamente molidos, y analizadas en su composición química proximal de proteína cruda (Nitrógeno x 6.25), extracto etéreo (lípidos), humedad, cenizas y fibra cruda con métodos estandarizados de la AOAC (2006) en el laboratorio de Bromatología de la Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nayarit. A continuación se determinó el contenido de energía bruta mediante un calorímetro isoperibólico. El extracto libre de nitrógeno fue calculado por diferencia de la composición proximal como % NFE = 100 – (% proteína + % extracto etéreo + % cenizas + % humedad + % fibra cruda).

Bioensayo de crecimiento

El sistema experimental consistió en 24 tanques de 1200 L conectados a un sistema de recirculación cerrado acoplado a un biofiltro previamente acondicionado con bacterias nitrificantes BioPro® Nitrobacter (Hobby Pet, Monterrey NL, México) para tratar el agua residual de los tanques con una tasa de recambio de agua de aproximadamente 360 % durante 24 h. En el bioensayo juveniles (peso inicial 9.6 ± 0.2 g) se evaluaron durante 45 días en condiciones controladas de temperatura (27 ± 2 °C), oxígeno disuelto (>6 mg/L) y fotoperiodo (12 h luz: 12 h oscuridad) a una densidad de cultivo de 10 tilapias/tanque. Tres dietas se suministraron con un modelo de alimentación a saciedad aparente (dietas control), y tres dietas con una estrategia de alimentación con restricción del 30 % respecto al consumo del tratamiento control en un diseño experimental con distribución completamente al azar por triplicado. Durante el bioensayo se realizaron biometrías al día 0, 15, 30, 45 después de un periodo de 24 h sin alimentación para estandarizar el peso de los animales. Los parámetros de calidad del agua como oxígeno disuelto y temperatura se midieron una vez por día a las 8.00 am usando un oxímetro modelo AZ 8403. Los contenidos de

model AZ8403. Ammonium, nitrites and nitrates contents were determined ever three days by means of a commercial colorimetric kit API-SALTWATER for freshwater, and pH was measured with a manual potentiometer. The rearing system was installed in the Academic Unit of Veterinary Medicine and Zootechnics of the Autonomous University of Nayarit, tilapia were conditioned in a tank of 2 m³ capacity at a temperature of 27 ± 0.5 °C and dissolved oxygen of 5.0 ± 0.7 mg/L under clear water conditions.

Productive parameters and economic analysis of the bioassay

At the end of the bioassay, productive zootechnical parameters were determined with standard formulas for fish and using criteria determined by Jauralde *et al.* (2011) to define the thermal growth coefficient by using the formula

$$TGC = \frac{HW^b - SW^b}{\sum_{i=1}^n T} \times 1000$$

The parameters of economic gains by effect of each experimental diet were determined by using the following equations used by Lozano *et al.* (2007): 1) Economic conversion ratio (USD \$/kg of tilapia); ECR = feed conversion (kg of diet/kg of tilapia) x feed cost (USD \$/kg of diet). 2) Economic profit index (USD \$/tilapia); EPI = [final weight (kg/tilapia) x tilapia sale price (USD \$/kg)] - [ECR (USD \$/kg of tilapia) x weight increase (kg)].

Profitability analysis

With the purpose of analyzing the profitability in terms of costs reduction of an intensive productive system of tilapia juveniles in greenhouse conditions, criteria described by Perea-Román *et al.* (2018) and Phiri & Yuan (2018) were utilized in order to establish the benefit/cost ratio (B/C) of three feeding strategies with feeds of different protein compositions when using the productive parameters of *O. niloticus* as theoretical basis, which were determined by means of the experimental bioassay with a diets with different protein/energy ratios. This process was designated as a baseline analysis and was realized by using the results of the growth bioassay with regards to the optimum growth rate of *O. niloticus* for the productive conditions from Compostela, Nayarit, Mexico.

Sensibility analysis

In order to determine the effect of the average annual total cost defined in the productive system with

amonio, nitritos y nitratos se determinaron cada tercer día a través de un kit colorimétrico comercial API-SALTWATER de agua dulce, y el pH fue medido con un potenciómetro manual. El sistema de cultivo se instaló en la Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Nayarit, las tilapias fueron acondicionadas en un tanque de 2 m³ de capacidad a temperatura de 27 ± 0.5 °C y oxígeno disuelto de 5.0 ± 0.7 mg/mL bajo condiciones de agua clara.

Parámetros productivos y análisis económico del bioensayo

Al final del bioensayo de crecimiento se determinaron los parámetros zootécnicos productivos con fórmulas estándar para peces y utilizando los criterios determinados por Jauralde *et al.* (2011) para definir el coeficiente térmico de crecimiento mediante la fórmula.

$$TGC = \frac{HW^b - SW^b}{\sum_{i=1}^n T} \times 1000$$

Los parámetros de ganancias económicas por efecto de cada dieta experimental se determinaron mediante las ecuaciones siguientes utilizadas por Lozano *et al.* (2007): 1) Índice de conversión económico (USD \$/kg de tilapia); ECR = conversión alimenticia (kg de dieta/kg de tilapia) x costo del alimento (USD \$/kg de dieta). 2) Índice de rentabilidad económico (USD \$/tilapia); EPI = [peso final (kg/tilapia) x precio de venta de tilapia (USD \$/kg)] - [ECR (USD \$/kg de tilapia) x incremento en peso (kg)].

Análisis de rentabilidad

Con el propósito de analizar la rentabilidad en términos de reducción de costos de un sistema productivo intensivo de juveniles de tilapia en condiciones de invernadero se utilizaron los criterios de Perea-Román *et al.* (2018) y Phiri & Yuan (2018) para establecer la relación beneficio/costo (B/C) de tres estrategias de alimentación con alimentos de diferente composición proteica al utilizar como fundamento teórico los parámetros productivos de *O. niloticus* determinados mediante el bioensayo experimental con un régimen de dietas con diferente relación proteína/energía. Este proceso se designó como análisis de línea base y se realizó utilizando los resultados del bioensayo de crecimiento respecto a la tasa de crecimiento óptima de *O. niloticus* para las condiciones de producción de Compostela, Nayarit, México.

Análisis de sensibilidad

Para determinar el efecto del costo total anual promedio definido en el sistema productivo con la mayor rentabilidad (línea base) se aplicó un análisis de sensibilidad a los ingresos

the higher profitability (baseline), a sensibility analysis was applied to the marginal incomes, assuming the following scenarios of production with accumulated increases in both analyzed variables: (Case 1) 10 % increase in feeding and 5 % in sale price of the product; (Case 2) 20 % increase in feeding and 5 % in sale price of the product; (Case 3) 30 % increase in feeding and 5 % in sale price of the product; (Case 4) 10 % increase in feeding and 10 % in sale price of the product; (Case 5) 20 % increase in feeding and 10 % in sale price of the product; (Case 6) 30 % increase in feeding and 10 % in sale price of the product. Additionally, B/C ratio of each scenario of production was determined to establish conclusions about the final profitability of this study in a five-years period.

Statistical analysis

The productive and economic parameters of the growth bioassay were analyzed for their normality and homogeneity of variances with Shapiro-Wilk's and Bartlett's tests, respectively (Sokal & Rohlf, 1995). A one-way ANOVA was performed on the determined variables and a Tukey's multiple comparison test in order to separate differences among groups with a significance level $\alpha = 0.05$. The calculations were processed with the STATISTICA kit Version 6.0 (StatSoft, Inc. Tulsa OK, USA). An analysis with 5000 repetitions was applied for the net present value (NPV) in a five-years financial run, with $\alpha = 0.01$, applying a variation of $\pm 1\%$ in the standard deviation of the studied variables, by means of a risk simulator software @RISK 7.5 (Palisade Corporation, Ithaca, NY, USA), from which the average profits were obtained considering three discount rates of the project (5 %, 10 % and 15 %).

Results and Discussion

Water quality and diet composition

Parameters of water quality, such as ammonium, nitrites, and nitrates presented values of 0.12 ± 0.22 mg/L, 2.48 ± 1.78 mg/L and 86.67 ± 36.67 mg/L respectively, which indicated a high variability in water nutrients throughout the experiment with presence of null or very low values due to the conversion process of the nitrogenized residues in the form of ammonia by nitrifying bacteria present in the biological filter, related

marginales asumiendo los siguientes escenarios de producción con incrementos acumulados en las dos variables analizadas: (Caso 1) incremento del 10 % en la alimentación y 5 % en el precio de venta del producto; (Caso 2) incremento del 20 % en la alimentación y 5 % en el precio de venta del producto; (Caso 3) incremento del 30 % en la alimentación y 5 % en el precio de venta del producto; (Caso 4) incremento del 10 % en la alimentación y 10 % en el precio de venta del producto; (Caso 5) incremento del 20 % en la alimentación y 10 % en el precio de venta del producto; (Caso 6) incremento del 30 % en la alimentación y 10 % en el precio de venta del producto. Adicionalmente se determinó la relación B/C de cada escenario de producción para establecer conclusiones sobre la rentabilidad final de este estudio en un periodo de 5 años.

Análisis estadísticos

Los parámetros productivos y económicos del bioensayo de crecimiento se analizaron en su normalidad y homogeneidad de varianzas con las pruebas de Shapiro-Wilk's y Bartlett's respectivamente (Sokal & Rohlf, 1995). Se aplicó una prueba ANOVA de una vía a las variables determinadas y un análisis de comparación múltiple de medias de Tukey para separar diferencias entre grupos con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los cálculos fueron procesados con el paquete STATISTICA Versión 6.0 (StatSoft, Inc. Tulsa OK, USA). Se aplicó un análisis con 5000 iteraciones para el valor actual neto (NPV) en una corrida financiera de cinco años con un $\alpha = 0.1$ aplicando una variación de $\pm 1\%$ en la desviación estándar de las variables estudiadas, mediante el software simulador de riesgos @RISK 7.5 (Palisade Corporation, Ithaca, NY, USA), del cual se obtuvieron las utilidades promedio considerando tres tasas de descuento del proyecto (5 %, 10 % y 15 %).

Resultados y Discusión

Calidad del agua y composición de la dieta

Los parámetros de calidad del agua de amonio, nitritos y nitratos presentaron valores de 0.12 ± 0.22 mg/L, 2.48 ± 1.78 mg/L y 86.67 ± 36.67 mg/L, respectivamente, lo que indicó una variabilidad alta en los nutrientes del agua a lo largo del experimento con presencia de valores nulos o muy bajos debido al proceso de conversión de los residuos nitrogenados en forma de amoníaco por las bacterias nitrificantes presentes en el filtro biológico, aunado a esto se registró una supervivencia

to this, a survival rate of 100 % was recorded in all of the treatments. These values were found within the range of standards reported in literature as adequate for the tilapia rearing (Ridha & Cruz, 2001). The composition of ingredients of the experimental growth diets are presented in Table 1, which had a P/E ratio from 18 to 21 kg/MJ, which was due to the inclusion of 8 %, 12 %, 16 % and 20 % of lipids, in other words, feeds were isoproteic (400 g/kg) but not isoenergetic in order to evaluate the hypothesis of the energy on the growth in a design with or without feed restriction.

Effect of the diet on productive variables of *O. niloticus*

Zootechnical parameters of growth and feed use were shown in Table 2. Feed energy content was considered as the major criterion to control fish feed intake (Lupastch *et al.*, 2001). In this study the level of the P/E ratio of the feed did not have affect the growth of *O. niloticus* among the different treatments ($p>0.05$) under the evaluated conditions, which is probably because the diets covered the requirement of maintenance and growth regardless of the dietary condition. Results indicated that the lower food intake was present with D8R diet (feeding protocol with 30 % restriction), consequently the consumed protein allowed for optimizing parameters of feed conversion and protein efficiency ($p<0.05$), hence this treatment was considered as the optimum to be evaluated in the next stage by means of a profitability analysis in tilapia juveniles rearing in response to the biological indicators recorded for growth rate, thermal growth coefficient, total feed and protein intake and feed efficiency. Likewise, results obtained for zootechnical parameters in this treatment were reflected in significant increases of economic conversion indexes of the feed and there was no negative effect in economic profitability indexes in the different treatments ($p<0.05$).

In the literature it was reported that optimal levels of the digestible protein and digestible energy (DP/DE), determined according to the size of the tilapia, present a high variability (Haidar *et al.*, 2018). These researches comprise a wide range of DP/DE with levels of 16.7 to 27 g/MJ, demonstrating that decreasing DP/DE values increases the efficiency of protein utilization at levels up to 53 %. One of the factors that probably affect this ratio is the use of lipids, which tends to decrease with regards to the increase of protein and fish size. In this

del 100 % en todos los tratamientos. Estos valores se encuentran dentro de los estándares reportados en la literatura como adecuados para el cultivo de tilapia (Ridha & Cruz, 2001). La composición de ingredientes de las dietas experimentales de crecimiento se presentan en la Tabla 1, los cuales tuvieron una relación P/E desde 18 a 21 kg/MJ lo cual se debió a la inclusión del 8 %, 12 %, 16 % y 20 % de lípidos, es decir, las dietas fueron isoproteicas (400 g/kg) pero no isoenergéticas con la finalidad de evaluar la hipótesis de la energía sobre el crecimiento en un diseño con y sin restricción de alimento.

Efecto de la dieta sobre las variables productivas de *O. niloticus*

Los parámetros zootécnicos de crecimiento y utilización del alimento se presentan en la Tabla 2. El contenido de energía del alimento es considerado como el mayor criterio para controlar la ingesta de alimento en los peces (Lupastch *et al.*, 2001). En este estudio el nivel de la relación P/E del alimento no afectó el crecimiento de *O. niloticus* entre los diferentes tratamientos ($p>0.05$) bajo las condiciones evaluadas, lo cual se debe probablemente a que las dietas cubrieron el requerimiento de mantenimiento y crecimiento independientemente de la condición alimentaria. Los resultados indican que la menor ingesta de alimento se presentó con la dieta D8R (protocolo de alimentación con restricción del 30 %), consecuentemente la proteína consumida permitió optimizar los parámetros de conversión alimenticia y eficiencia proteica ($p<0.05$), por lo tanto este tratamiento se consideró como el óptimo para evaluarse en una siguiente etapa mediante un análisis de rentabilidad en el cultivo de juveniles de tilapia en respuesta a los indicadores biológicos registrados de tasa de crecimiento, coeficiente térmico de crecimiento, alimento total y proteína ingeridos y eficiencia alimenticia. De la misma forma los resultados obtenidos en los parámetros zootécnicos de este tratamiento se reflejaron en aumentos significativos en los índices de conversión económica del alimento y no se presentó un efecto negativo en el índice de rentabilidad económica en los diferentes tratamientos ($p<0.05$).

En la literatura se reportó que los niveles óptimos de la relación proteína digestible y energía digestible (DP/DE) determinados en función del tamaño de la tilapia presentan una variabilidad alta (Haidar *et al.*, 2018). Estas investigaciones cubren un amplio rango de DP/DE con niveles de 16.7 a 27 g/MJ, demostrando que al disminuir los valores de DP/DE se incrementa la eficiencia de utilización de la proteína en niveles de hasta 53 %. Uno de los factores que probablemente afectan esta relación es el uso de los lípidos el cual tiende a disminuir en función del incremento de la proteína y del tamaño del

research, the growth of the fish with respect to the P/E ratio in the diet did not show significant differences among the different diets with and without feed restriction, evidencing that there was no positive effect in protein-sparing mechanism for growth with regards to the increase of feed energy level. The phenomenon of protein sparing has been extensively studied during the last three years in different species of freshwater and marine fish (Jian *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2017; Francis & Turchini, 2017; Rasool *et al.*, 2018; Weihe *et al.*, 2018). This process indicates that during growth stage, fish manifest protein sparing for the formation of muscular accretion by preferably using lipids and carbohydrates as sources of energy, as demonstrated in the researches of Azevedo *et al.* (2002) in diets for the Atlantic salmon (*Salmo salar*) with different levels of DP/DE (20, 18 and 20 g/MJ) supplied in two feeding levels (100 % or 85 % of the requirements) and also as documented in research performed by Jantrarotai *et al.* (1998) realized on hybrid freshwater catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) fingerlings which were fed with diets having different protein levels (20 %, 30 % and 40 %) and energy (275, 300 and 325 kcal of digestible energy/100 g). In this study, unlike previous works, diets were not used in a design with different protein levels, since it was required to design a model of growth where the maximum growth rate would be found according to nutritional and energetic quality of the diet, and that this process would allow for the maximum value of the thermal growth coefficient (TGC), suggesting that this type of design affected in the non-detection of the phenomenon of protein sparing in reference to the results found in the works mentioned. The average TGC determined in this study was 11.44 and is comparable to that reported for *Salmo salar* (12.6 ± 0.08) by Janssen *et al.* (2017); however, this value is far more superior than the one reported for gilthead bream (*Sparus aurata*) by Jauralde *et al.* (2011) who registered accumulated thermal units (ATUs) in ranges of 704–41079 and values of TGC of 0.066–1.58 for different experiments in an experimental period between 64 and 90 days, and in turn with conversion rates from 1.3 to 2.75. What is valued from these comparisons is that there is a direct relation between TGC and feeding rate, an aspect defined by Janssen *et al.* (2017) as “thermal feed intake coefficient” which is directly dependent of TGC, whereby the validity of the proposed growth model is centered on feed rate utilization for *O. niloticus* depending on ATUs in a 45 days-period, and later the application of this principle in the proposed design in

pez. En esta investigación, el crecimiento de los peces respecto a la relación P/E en la dieta no presentó diferencias significativas entre las diferentes dietas con y sin restricción de alimentación, evidenciando que no hay un efecto positivo en el mecanismo de ahorro de proteína para crecimiento en función del incremento del nivel de energía del alimento. El fenómeno de ahorro de proteína se ha estudiado en forma extensiva durante los últimos tres años en diferentes especies de peces dulceacuícolas y marinos (Jiang *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2017; Francis & Turchini, 2017; Rasool *et al.*, 2018; Weihe *et al.*, 2018). Este proceso indica que durante la etapa de crecimiento el pez manifiesta un ahorro de proteína para la formación de acreción muscular utilizando preferentemente lípidos y carbohidratos como fuentes de energía, tal como lo han demostrado las investigaciones de Azevedo *et al.* (2002) en dietas para el salmón del Atlántico (*Salmo salar*) con diferentes niveles de DP/DE (20, 18 y 20 g/MJ) suministradas en dos niveles de alimentación (100 % o 85 % de los requerimientos) y también como se documentó en los trabajos de Jantrarotai *et al.* (1998) realizado con alevines de un pez gato de agua dulce híbrido (*Clarias macrocephalus* x *Clarias gariepinus*) alimentados con dietas de diferentes niveles de proteína (20 %, 30 % y 40 %) y energía (275, 300 y 325 kcal de energía digestible/100 g). En el presente estudio a diferencia de los trabajos anteriores no se utilizaron dietas en un diseño con diferentes niveles de proteína, ya que se requería diseñar un modelo de crecimiento donde se encontrara la máxima tasa de crecimiento en función de la calidad nutricional y energética de la dieta, y que este proceso permitiera el máximo valor del coeficiente térmico de crecimiento (TGC), por lo que se sugiere que este tipo de diseño influyó en que no se detectará el fenómeno de ahorro de proteína en referencia a los resultados encontrados en los trabajos citados. El TGC promedio determinado en este estudio fue de 11.44 y es comparable al reportado para *Salmo salar* (12.6 ± 0.08) por Janssen *et al.* (2017); sin embargo, este valor es muy superior al reportado para la dorada española (*Sparus aurata*) por Jauralde *et al.* (2011) quienes registraron unidades térmicas acumuladas (ATUs) en rangos de 704–1079 y valores del TGC de 0.066–1.58 para diferentes experimentos en un periodo experimental entre 64 y 90 días, y a su vez con tasas de conversión de 1.3 a 2.75. Lo que se valora de estas comparaciones es que hay una relación directa entre el TGC y la tasa de alimentación, aspecto que es definido por Janssen *et al.* (2017) como “coeficiente térmico de consumo alimenticio” el cual es dependiente directamente del TGC, por lo cual la validez del modelo de crecimiento planteado se centra en la tasa de utilización del alimento por *O. niloticus* en función de las ATUs en un periodo de 45 días, y posteriormente la aplicación de este principio en el diseño

Table 2.
Zootechnical and economic parameters of the growth trial determined for 45 days in juvenile Nile tilapia in two feeding conditions (mean \pm ED, n=3).

Tabla 2.
Parámetros zootécnicos y económicos del bioensayo de crecimiento determinados durante 45 días en juveniles de tilapia nilótica en dos condiciones de alimentación (promedio \pm DE, n=3).

	Apparent satiety feeding (diets D8-D20)				Feeding with 30% of restriction (diets D8R-D20R)			
	D8	D12	D16	D20	D8R	D12R	D16R	D20R
Live final weight (g)	150.4 \pm 3.36 ^a	145.96 \pm 12.70 ^a	146.6 \pm 5.03 ^a	137.70 \pm 10.69 ^a	134.78 \pm 4.14 ^a	137.53 \pm 4.50 ^a	133.75 \pm 5.96 ^a	139.15 \pm 12.60 ^a
Growth rate (%/day)	6.25 \pm 0.05 ^a	6.18 \pm 0.18 ^a	6.20 \pm 0.07 ^a	6.07 \pm 0.17 ^a	6.04 \pm 0.05 ^a	6.07 \pm 0.08 ^a	6.01 \pm 0.08 ^a	6.10 \pm 0.20 ^a
Thermal growth coefficient x 1000	12.15 \pm 0.03 ^a	11.62 \pm 0.65 ^a	11.68 \pm 0.48 ^a	11.30 \pm 0.69 ^a	11.33 \pm 0.62 ^a	11.25 \pm 0.17 ^a	11.07 \pm 0.77 ^a	11.12 \pm 0.59 ^a
Accumulated thermal degrees (°C)	272 \pm 14 ^a	280 \pm 10 ^a	279 \pm 7 ^a	280 \pm 11 ^a	277 \pm 10 ^a	281 \pm 8 ^a	282 \pm 13 ^a	286 \pm 9 ^a
Feed intake (g/tilapia/day)	5.38 \pm 0.14 ^b	5.74 \pm 0.22 ^a	5.84 \pm 0.13 ^a	5.69 \pm 0.07 ^a	3.61 \pm 0.02 ^d	3.84 \pm 0.02 ^{cd}	3.98 \pm 0.01 ^c	3.79 \pm 0.07 ^{cd}
Protein intake (g/tilapia/day)	2.15 \pm 0.06 ^b	2.31 \pm 0.09 ^a	2.35 \pm 0.05 ^a	2.28 \pm 0.03 ^a	1.44 \pm 0.01 ^d	1.54 \pm 0.01 ^{cd}	1.60 \pm 0.004 ^c	1.52 \pm 0.03 ^{cd}
Protein efficiency ratio (g/g)	1.55 \pm 0.07 ^a	1.40 \pm 0.07 ^a	1.39 \pm 0.07 ^a	1.35 \pm 0.11 ^a	2.09 \pm 0.05 ^b	1.98 \pm 0.07 ^b	1.86 \pm 0.08 ^b	2.05 \pm 0.21 ^b
Feed conversion (kg/kg)	1.61 \pm 0.07 ^a	1.78 \pm 0.08 ^a	1.80 \pm 0.09 ^a	1.86 \pm 0.15 ^a	1.19 \pm 0.03 ^b	1.25 \pm 0.05 ^b	1.34 \pm 0.06 ^b	1.23 \pm 0.13 ^b
Economic conversion ratio ¹ (USD \$/kg of tilapia)	3.62 \pm 0.17 ^{bc}	4.25 \pm 0.20 ^{ab}	4.39 \pm 0.23 ^a	4.83 \pm 0.38 ^a	2.68 \pm 0.07 ^d	3.00 \pm 0.11 ^{cd}	3.27 \pm 0.14 ^{cd}	3.18 \pm 0.34 ^{cd}
Economic profit index ² (USD \$/tilapia)	3.03 \pm 0.09 ^a	2.85 \pm 0.26 ^a	2.84 \pm 0.12 ^a	2.63 \pm 0.17 ^a	2.89 \pm 0.07 ^a	2.89 \pm 0.11 ^a	2.78 \pm 0.12 ^a	2.90 \pm 0.30 ^a

Different letters in the superscripts of each row indicate significant differences when comparing both conditions independently (Tukey, $p < 0.05$). ¹Considering in the calculation the feed prices of \$ 2.24, \$ 2.39, \$ 2.44 and \$ 2.59 for diets D8, D12, D16 and D20 respectively, values expressed in US dollars with prices of the raw material of November 2018. ²Tilapia sale price was calculated at 2.24 USD \$/kg (\approx 6.5 fishes/kg).

Letras diferentes en los superíndices de cada fila indican diferencias significativas al compararse ambas condiciones independientemente (Tukey, $p < 0.05$). ¹Considerando en el cálculo precios del alimento de \$ 2.24, \$ 2.39, \$ 2.44 y \$ 2.59 para las dietas D8, D12, D16 y D20 respectivamente, valores expresados en dólares US con precios de la materia prima de noviembre de 2018. ²Considerando en el cálculo un precio de venta de la tilapia en USD\$ 2.24 el kilogramo (\approx 6.5 peces/kg).

Table 3.
Profitability analysis of tilapia production with average weight of 150 g in an annual cycle under intensive conditions in tanks with different feeding strategies.

Tabla 3.
Análisis de rentabilidad de la producción de tilapia con peso promedio de 150 g en un ciclo anual en condiciones intensivas en tanques con diferentes estrategias de alimentación.

	Strategy A 1H:1L ^x	Strategy B 2H:1L ^y	Strategy C 3H:2L ^z
Productive parameters under greenhouse conditions with 14 tanks of 12 m ³			
Total volume of the system (m ³ /tank/year) ¹	432	432	432
Initial culture density (tilapia/m ³ /tank) ²	218	218	218
Initial biomass of fingerlings (kg/period/year) ²	42	42	42
Accumulated thermal units (°C/period/year) ^{3,4}	310.6	310.6	310.6
Accumulated thermal units (°C/year) ^{3,4}	1,800	1,800	1,800
Periods of culture (period/year) ⁵	6	6	6
Periods time culture (days/period/year) ⁵	53.5	53.5	53.5
High value consumed protein (kg/period/year) ⁶	1622	3245	3245
Low value consumed protein (kg/period/year) ⁷	1014	676	507
Protein intake (g/tilapia/day)	1.17	1.74	1.67
Feed conversion (period/year) ⁵	1.2	1.1	1.0
Biomass tank performance (kg/period/year) ⁸	5,660	6,226	7,358
Total biomass yield (kg/year) ⁸	33,285	36,614	43,271
Variable costs (\$ thousands of dollars USD)*			
<i>O. niloticus</i> fingerlings (\$/year)	\$ 6.28	\$ 6.28	\$ 6.28
High protein feed (\$/year) ⁶	\$ 26.70	\$ 35.60	\$ 40.05
Low protein feed (\$/year) ⁷	\$ 19.42	\$ 12.95	\$ 8.21
Medicines (\$/year)	\$ 0.10	\$ 0.10	\$ 0.10
Electricity (\$/year)	\$ 2.82	\$ 2.92	\$ 3.01
Workforce \$/year)	\$ 2.00	\$ 2.00	\$ 2.00
Well water supply (\$/year)	\$ 0.78	\$ 0.78	\$ 0.78
Installed geomembranes of 16 m ³ (\$/year)	\$ 14.57	\$ 14.57	\$ 14.57
Electrical and equipment installations (\$/year)	\$ 2.73	\$ 2.73	\$ 2.73
Equipment maintenance (\$/year)	\$ 0.99	\$ 0.99	\$ 0.99

Fixed costs (\$ thousands of dollars USD)*						
Equipment (\$/year)	\$	17.38	\$	17.38	\$	17.38
Land rent (\$/year)	\$	0.12	\$	0.12	\$	0.12
Administrative expenses and marketing (\$/year)	\$	0.72	\$	0.72	\$	0.72
Economic analysis of annual profitability (\$ thousands of dollars USD)*						
Total costs (TC)	\$	94.61	\$	97.14	\$	96.95
Fixed costs (FC)	\$	76.39	\$	78.92	\$	78.73
Total variable costs (TVC)	\$	18.21	\$	18.21	\$	18.21
Average variable costs (AVC)	\$	0.55	\$	0.50	\$	0.42
Yield per year in thousands of kg (Q) ⁸		33.29		36.61		43.27
Sale price in dollars per kg of tilapia (P)	\$	2.49	\$	2.49	\$	2.49
Gross income (R)	\$	83.01	\$	91.31	\$	107.91
Total gain (TG)	\$	64.79	\$	73.09	\$	89.69
Marginal gain (MG)	\$	0.03	\$	0.04	\$	0.05
Benefic/cost ratio (BCR)		0.88		0.94		1.11
Balance price in dollars (BP)	\$	2.84	\$	2.64	\$	2.24
Production of equilibrium in thousands of kg (PE)		39.25		39.53		37.99
Gross profit per kg of tilapia in dollars (GPK)	\$	1.95	\$	2.00	\$	2.07

*Strategy A: Feeding (1:1) 24 h with high protein and 24 h with low protein as accumulated time.

†Strategy B: Feeding (2:1) 48 h with high protein and 24 h with low protein as accumulated time.

‡Strategy C: Feeding (3:2) 36 h with high protein and 48 h with low protein as accumulated time.

§Production system modeled in 12 tanks of 36 m³ with top cover of reinforced plastic.

¶Modeling with 291 tilapias/m³ with an initial weight of 1 g and a price of \$ 0.02 USD by fingerling.

‡Considering a thermal growth coefficient of 11.33 from Table 2.

§Statistical variation from Compostela, Nayarit (28.9–24.7 °C) for a time series of 10 years.

¶Calculations with growth rate of the *O. niloticus* and the protein consumption rate of Table 2.

‡Calculated with a commercial feed price of \$ 1.003 USD/kg with 35 % of protein.

§Calculated with a commercial feed price of \$ 1.253 USD/kg with 25 % of protein.

¶Estimated value with a total cumulative mortality in the culture of 2 %.

Equations: $R = P \times Q$; $TC = TVC + FC$; $AVC = TVC/Q$; $TG = Q \times (P - AVC) - FC$; $MG = TG/TC$; $BCR = R/TC$; $PE = AVC + (FC/Q)$; $PE = FC/(P - TVC/Q)$ according to the Phiri and Yuan approaches described in 2018. The criterion of GP was determined with the equation $GP = TG/Q$ as reported by Besson *et al.* (2016).

*The conversion of dollar to Mexican peso used was: 1 USD \$ = 20.05 pesos (November, 2018).

†Estrategia A (alimentación 1:1 con alta y baja proteína serie 24hx24 h como tiempo de alimentación).

‡Estrategia B (alimentación 2:1 con alta y baja proteína serie 48hx24 h como tiempo de alimentación).

§Estrategia C (alimentación 3:2 con alta y baja proteína serie 36hx48 h como tiempo de alimentación).

¶Sistema productivo modelado en 12 tanques de 36 m³ con cubrimiento superior de plástico reforzado.

‡Modelado con 291 tilapias/m³ con un peso inicial de 1 g y un costo de \$ 0.5 pesos/alevin.

§Considerando un coeficiente térmico de crecimiento de 11.33 proveniente de Tabla 2.

¶Variación estadística de Compostela, Nayarit (28.9–24.7 °C) para una serie de tiempo de 10 años.

‡Cálculos con datos de crecimiento de *O. niloticus* y la tasa de consumo de proteína de Tabla 2.

§Calculada con un precio de alimento comercial de \$ 20 pesos/kg con 35 % proteína.

¶Calculada con un precio de alimento comercial de \$ 16 pesos/kg con 25 % proteína.

‡Valor estimado con una mortalidad acumulada total en el cultivo de 2 %.

Ecuaciones: $R = P \times Q$; $TC = TVC + FC$; $AVC = TVC/Q$; $TG = Q \times (P - AVC) - FC$; $MG = TG/TC$; $BCR = R/TC$; $PE = AVC + (FC/Q)$; $PE = FC/(P - TVC/Q)$ de acuerdo con los planteamientos de Phiri y yuan (2018). El criterio de GP fue determinado con la ecuación $GP = TG/Q$ según lo reportado por Besson *et al.* (2016).

*La conversión de dólar a peso mexicano utilizado fue: \$ 1 USD = \$20.05 (Noviembre de 2018).

Table 4.
Simulation of benefits and risks in different tilapia production scenarios regarding changes in the mean values of the feed cost and in the fish sale price over a period of 5 years based on the projections determined in Table 3.

Tabla 4.
Simulación de beneficios y riesgos en diferentes escenarios de producción de tilapia respecto a cambios en los valores medios del costo del alimento y en el precio de venta del pescado en un periodo de 5 años en base a las proyecciones determinadas en la Tabla 3.

Limiting factors in the calculations: initial weight of 10 g, final weight of harvest of 150 g and an average annual production of 43,271 kg										
Parameters or simulations	BPC	GPT	TGI	CFM	TFC	TVC	BCR	NPV (5%)	NPV (10%)	NPV (15%)
Baseline performance	\$2.13	\$0.94	\$539.54	\$241.33	\$393.67	\$21.55	1.3	\$ 85.27 ± 4.10	\$ 71.71 ± 3.38	\$ 60.83 ± 2.81
Feed cost >10% (A)*	\$2.23	\$0.84	\$539.54	\$260.64	\$412.98	\$21.55	1.2	\$ 68.97 ± 4.21	\$ 57.80 ± 3.47	\$ 48.85 ± 2.89
Feed cost >20% (B)*	\$2.33	\$0.74	\$539.54	\$279.95	\$432.28	\$21.55	1.2	\$ 52.67 ± 4.29	\$ 43.89 ± 3.54	\$ 36.86 ± 2.94
Feed cost >30% (C)*	\$2.43	\$0.64	\$539.54	\$299.25	\$451.59	\$21.55	1.1	\$ 36.37 ± 4.13	\$ 71.71 ± 3.40	\$ 60.83 ± 2.83
Fish sale price <5% (D)*	\$2.13	\$0.78	\$512.56	\$208.48	\$393.67	\$21.55	1.2	\$ 85.27 ± 82.8	\$ 1,437.7 ± 68.2	\$ 1,219.6 ± 56.8
Fish sale price <10% (E)*	\$2.13	\$0.62	\$485.59	\$208.48	\$393.67	\$21.55	1.2	\$ 85.27 ± 4.14	\$ 71.71 ± 3.41	\$ 60.83 ± 2.84
Fish sale price <15% (F)*	\$2.13	\$0.46	\$458.61	\$208.48	\$393.67	\$21.55	1.1	\$ 85.27 ± 4.09	\$ 71.71 ± 3.37	\$ 60.83 ± 2.80
Fish sale price >5% (G)*	\$2.13	\$1.10	\$566.51	\$208.48	\$393.67	\$21.55	1.4	\$ 98.35 ± 4.18	\$ 82.35 ± 3.45	\$ 69.53 ± 2.87
Fish sale price >10% (H)*	\$2.13	\$1.26	\$593.49	\$208.48	\$393.67	\$21.55	1.4	\$ 111.44 ± 4.41	\$ 92.99 ± 3.63	\$ 78.23 ± 3.02
Simulation–1 A + G*	\$2.23	\$1.00	\$566.51	\$260.64	\$412.98	\$21.55	1.3	\$ 100.27 ± 4.48	\$ 83.99 ± 3.69	\$ 70.94 ± 3.07
Simulation–2 B + G*	\$2.33	\$0.90	\$566.51	\$279.95	\$432.28	\$21.55	1.3	\$ 65.76 ± 4.47	\$ 54.53 ± 3.69	\$ 45.57 ± 3.07
Simulation–3 C + G*	\$2.43	\$0.80	\$566.51	\$299.25	\$451.59	\$21.55	1.2	\$ 65.76 ± 4.36	\$ 54.53 ± 3.60	\$ 45.57 ± 2.99
Simulation–4 A + H*	\$2.23	\$1.16	\$593.49	\$260.64	\$412.98	\$21.55	1.4	\$ 95.14 ± 4.40	\$ 79.08 ± 3.63	\$ 66.25 ± 3.02
Simulation–5 B + H*	\$2.33	\$1.06	\$593.49	\$279.95	\$432.28	\$21.55	1.3	\$ 78.84 ± 4.54	\$ 65.18 ± 3.74	\$ 54.27 ± 3.11
Simulation–6 C + H*	\$2.43	\$0.96	\$593.49	\$299.25	\$451.59	\$21.55	1.3	\$ 62.54 ± 4.62	\$ 51.27 ± 3.81	\$ 42.29 ± 3.17

*Calculations made on the data of the optimal conditions determined in the performance of the baseline (+ or –). Values expressed in thousands of USD dollars except the B/C ratio. Nomenclature: BPC = biomass production cost per ton; GPT = Gross profit per ton of tilapia; TGI = total gross income; CFM = average cost of the proposed feeding model (3H:2L); TFC = total fixed costs; TVC = total variable costs; BCR = benefit/cost ratio; NPV = net present value. The conversion of dollar to Mexican peso used was: \$ 1 USD = 20.05 pesos (November, 2018).

*Cálculos realizados sobre los datos de las condiciones óptimas determinadas en el rendimiento de la línea base (+ o –). Valores expresados en miles de dólares USD excepto la relación B/C. Nomenclatura: BPC = costo de producción de biomasa por ton; GPT = Ganancia bruta por ton de tilapia; TGI = ingresos brutos totales; CFM = costo promedio del modelo de alimentación propuesto (3H:2L); TFC = costos fijos totales; TVC = costos variables totales; BCR = relación beneficio/costo; NPV = valor actual neto. La conversión de dólar a peso mexicano utilizado fue: \$ 1 USD = \$20.05 (noviembre de 2018).

the annual model and during the evaluated five years-period (Tables 2, 3 and 4), respectively.

Growth models by means of logarithmic equations depending on optimum growth temperature have been evaluated in tilapia by Baras *et al.* (2002), also by means of equations of daily growth with standardized exponents according to Trong *et al.* (2013), and more recently by Omasaki *et al.* (2017) with TGC records of 1.30 in tilapia during the growth phase of 5 g to 250 g in farms from Kenia at a density of 3 fish/m². Nevertheless, too few data are currently available on these elements, in conditions of intensive rearing for the region of Latin America, being necessary going deeper into these determinations. Some researchers have determined that the importance of TGC in the biological model lies on its simplicity since it is a limiting condition that affects production (Janssen *et al.*, 2017).

The compensatory growth is defined as an unusually fast growth stage in which animals are subjected to a partial or total nutritional restriction, and the exploitation of this phenomenon can result in benefits on growth rate and feeding efficiency (Gabriel *et al.*, 2018). In fish like barramundi (*Lates calcarifer*) there are evidences for compensatory growth when they were fed at 0 %, 25 %, 50 % and 75 % of the apparent satiety level during two weeks before a period of five weeks with feeding by satiety in which there were negative significant statistical differences in the quantity of consumed food with regards to the control treatment (Tian & Quin, 2003). This phenomenon has been demonstrated in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) (Dobson & Holmes, 1984), in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) (Gaylord & Gatlin, 2001) and in European bass (*Dicentrarchus labrax*) (Adakli & Tasbozan, 2015), among others. The compensatory growth of tilapia has been evidenced in the works of Wang *et al.* (2000) in *Oreochromis mossambicus* x *O. niloticus* hybrids with an initial weight of 4.34 ± 0.03 g in an experiment with a duration of 8 weeks, evidencing that one fasting week allowed for growth rate similar to those observed in the control. A similar response was also found in fish with an initial weight of 8.9 ± 0.2 g fasten for one week and for a 12-week refeeding period (Abdel-Tawwab *et al.*, 2006). More recently, the investigation of Liu *et al.* (2018) evaluated a feeding system with a low-protein diet (25 %) supplied for 10 days in comparison with a high-protein diet (35 %) for 20 days with *O. niloticus* with an initial weight of 11.02 ± 0.05 g and found similar

planteado en el modelo anual y durante el periodo evaluado de cinco años (Tablas 2, 3 y 4) respectivamente.

Los modelos de crecimiento mediante ecuaciones logarítmicas en función de la temperatura óptima de crecimiento se han evaluado en tilapia por Baras *et al.* (2002), también mediante ecuaciones de crecimiento diario con exponentes estandarizados según Trong *et al.* (2013), y últimamente por Omasaki *et al.* (2017) con registros de TGC de 1.30 en tilapias durante la fase de crecimiento de 5 g a 250 g en granjas de Kenia a una densidad de 3 peces/m². No obstante, de estos elementos actualmente no hay mucha información disponible en condiciones de cultivo intensivo para la región de América Latina, siendo necesario profundizar en estas determinaciones. Algunas investigaciones han determinado que la importancia del TGC en el modelo biológico radica en su simplicidad ya que es una condición limitante que afecta la producción (Janssen *et al.*, 2017).

El crecimiento compensatorio se define como una fase de crecimiento inusualmente rápido en la cual los animales están sujetos a una restricción nutricional parcial o completa, y la explotación de este fenómeno puede resultar en beneficios sobre la tasa de crecimiento y la eficiencia de la alimentación (Gabriel *et al.*, 2018). En peces como el barramundi (*Lates calcarifer*) hay evidencias de crecimiento compensatorio cuando fueron alimentados al 0 %, 25 %, 50 % y 75 % del nivel de saciedad aparente durante dos semanas antes de un periodo de cinco semanas de alimentación por saciedad en el cual hubo diferencias estadísticas significativas negativas en la cantidad de alimento consumido respecto al tratamiento control (Tian & Quin, 2003). Este fenómeno se ha demostrado en la trucha arcoíris (*Salmo gairdneri*) (Dobson & Holmes, 1984), en el bagre de canal (*Ictalurus punctatus*) (Gaylord & Gatlin, 2001) y en la lobina europea (*Dicentrarchus labrax*) (Adakli & Taşbozan, 2015), entre otros. El crecimiento compensatorio de la tilapia se ha puesto en evidencia en los trabajos de Wang *et al.* (2000) en híbridos *Oreochromis mossambicus* x *O. niloticus* con peso inicial de 4.34 ± 0.03 g en un experimento con duración de 8 semanas evidenciando que una semana de ayuno de los peces permite tener crecimientos similares al control. También se encontró una respuesta similar en peces con peso inicial de 8.9 ± 0.2 g sometidos a ayuno durante una semana y por un periodo de 12 semanas de realimentación (Abdel-Tawwab *et al.*, 2008). Más recientemente, la investigación de Liu *et al.* (2018) evaluaron un sistema de alimentación con una

results to that of the control. Works on other species of tilapia juveniles like *O. mossambicus* developed by Gabriel *et al.* (2017; 2018) suggested that hyperphagia could be the main contributor to the high growth rates during the compensatory period, and in fasting periods, results suggested that fish adjust their metabolic rate. In summary, it is known from these investigations that the compensatory growth rate of tilapia can be maintained in a manner similar to fish fed at satiety when a constant feeding rate is used with intervals providing diets with high-level and low-level of protein

Profitability analysis

The study of the baseline represented on Table 2 was defined as the starting point from the biologic model to the economic model, in which it was determined that feed economic conversion increased in diets with feeding to apparent satiety and finding the best results in terms of feed use in D8R diet since it presented the lowest value ($p < 0.05$).

Profitability analyses by means of simulation models in aquatic organisms have been taken into account in the decision-making process for organisms like: the Peruvian scallop (*Argopecten purpuratus*) in order to define the fattening model based on the harvest size (Molina *et al.*, 2012); the lambari tetra mojarra (*Hyphessobrycon balbus*) in order to analyze the economic viability of the investment by means of the internal rate of return of the project with an five-years economic viability analysis (Sabbag *et al.*, 2011); the Atlantic salmon (*Salmo salar*) for its rearing in marine ranches with other species like Arctic char (*Salvelinus alpinus*) and European lobster (*Homarus gammarus*) and examining both biological and economic bases, by using the NPV approach on the annual operation costs (Moksness *et al.*, 1998); the threadfin (*Polydactylus sexfilis*) in order to evaluate the feasibility of its production in cages by means of a sensibility analysis with an increase of production density, survival rate and growth rate (Kam *et al.*, 2003), to mention a few examples. In *O. niloticus*, the research performed by Ponzoni *et al.* (2007) stands out, in which an economic modeling of annual gains of low and high genetic traits of inheritability of tilapia was applied on parameters of harvest weight, survival, and consumed food, with a discount rate from 5 % to 15 % to the model, finding positive benefits up to 75 % of the cost/benefit ratio with regards to the basal condition even at the superior level. The work realized by Perea-Román *et*

dieta baja en proteína (25 %) suministrada por 10 días en comparación con una dieta alta en proteína (35 %) por 20 días para *O. niloticus* de un peso inicial de 11.02 ± 0.05 g encontrando resultados similares al control. Los trabajos en otras especies de tilapias juveniles como *O. mossambicus* desarrollado por Gabriel *et al.* (2017; 2018) sugieren que la hiperfagia puede ser el principal contribuyente a las altas tasas de crecimiento durante el periodo compensatorio, y en los periodos de ayuno los resultados sugieren que los peces tienen un ajuste sobre la tasa metabólica. En resumen, de estas investigaciones se conoce que la tasa de crecimiento compensatorio de la tilapia puede mantenerse en forma similar a los peces alimentados a saciedad cuando se utiliza una tasa alimentaria constante con intervalos de alimentación suministrando dietas de alto nivel y bajo nivel de proteína.

Análisis de rentabilidad

El estudio de la línea base representada en la Tabla 2 se definió como el punto de partida del modelo biológico al modelo económico, en la cual se determinó que la conversión económica del alimento se incrementa en las dietas con alimentación a saciedad aparente encontrándose el mejor resultado en términos de utilización del alimento en la dieta D8R ya que obtuvo el valor más bajo ($p < 0.05$).

Los análisis de rentabilidad mediante modelos de simulación en organismos acuáticos han sido abordados en el proceso de toma de decisiones para organismos como: el ostión del Norte (*Argopecten purpuratus*) para definir el modelo de engorda basándose en la talla de cosecha (Molina *et al.*, 2012); en la mojarra lambarí (*Hyphessobrycon balbus*) para analizar la viabilidad económica de la inversión mediante la tasa interna de retorno del proyecto con un análisis de viabilidad económica de cinco años (Sabbag *et al.*, 2011); en el salmón del Atlántico (*Salmo salar*) para su cultivo en ranchos marinos con otras especies como la trucha ártica (*Salvelinus alpinus*) y la langosta europea (*Homarus gammarus*) examinando tanto la base biológica como la económica utilizando el enfoque de la NPV sobre los costos de operación anuales (Moksness *et al.*, 1998); en el moi Hawaiano (*Polydactylus sexfilis*) para evaluar la factibilidad de su producción en jaulas mediante un análisis de sensibilidad con aumento de la densidad de producción, la tasa de supervivencia y la tasa de crecimiento (Kam *et al.*, 2003) por describir algunos ejemplos. En *O. niloticus* sobresale la investigación de Ponzoni *et al.* (2007) en la cual se aplicó un modelado económico sobre la ganancia anual de rasgos genéticos de baja y alta heredabilidad de la tilapia sobre los parámetros peso de cosecha, supervivencia y alimento consumido aplicando al modelo una tasa de descuento de 5 % al 15 %, encontrando beneficios positivos sobre la relación beneficio/costo hasta del 75 % respecto a la

al. (2018) stands out as well, in which the use of the chemical silage of viscera of trouts was economically evaluated at levels of 10 %, 20 % and 30 % in diets for red tilapia, emphasizing that when increasing the inclusion of silage, the cost of the food was significantly reduced up to a 22.97 %.

The sensitivity analysis showed that for each rearing scenario the effects on productivity were determined with regards to the reduction of the production costs (Table 4). Nonetheless, the most significant reduction of profitability was observed when the production scenarios sales price of 5-10 % and cost feeding cost of 10-30 % were combined, where the benefit/cost ratio fluctuated between 1.2 and 1.4, showing a trend to reduce profitability when the price of the feed increases to the highest estimated level (30 %) upon production costs. Profitability analysis by annual cycle (Table 3) indicated that there were variations in percentages of the obtained biomass, total marginal profit, benefit/cost ratio, production of equilibrium and gross profits in favor of feeding strategy C (3H:2L). This trend has been well documented in literature, regarding this; the revision realized by Ali *et al.* (2003) stands out, where a deep revision was done about why animals grow at rates below their physiological capacity. These elements are fundamental for the selection process of the studied variables in the growth bioassay and in the profitability evaluations of *O. niloticus* rearing, developed in the models from Tables 2, 3 and 4 respectively.

Traditional NPV analysis models are centered on the profitability of a determined business unit, while a benefit/cost analysis has a far wider reach. The benefit/cost ratio is a common indicator that is used for the elaboration of budgets of capital to determine the profitability of a proposed investment, therefore, an investment is profitable if the benefit/cost ratio is greater than 1 (Phiri & Xuan, 2018). In this sense, results of the profitability analysis (Table 4) presented positive values, which allowed for establishing a production cost per ton of \$ 2.13 thousand dollars, in addition to a gross profit per ton of biomass of \$ 0.94 thousand dollars, establishing as determined in the baseline of the calculation with a price of \$ 2.24 dollars/kg of produced tilapia. This profit margin is negative and positively modified in the projections of scenarios 1 to 6 (box in Table 4), despite this, theoretical profits were determined for the gross profit per ton between \$ 0.80 and \$ 1.16 thousand dollars, considering that there

condición basal aun en el nivel superior. También destaca el trabajo de Perea-Román *et al.* (2018) en donde se valoró económicamente la utilización de ensilaje químico de vísceras de trucha en niveles de 10 %, 20 % y 30 % en dietas para tilapia roja, destacando que al aumentar la inclusión de ensilaje el costo del alimento se reduce significativamente hasta un 22.97 %

El análisis de sensibilidad muestra que para cada escenario de cultivo se determinan efectos en la productividad en función de la reducción de los costos de producción (Tabla 4). Sin embargo, la reducción de rentabilidad más significativa se observa cuando los escenarios de producción precio de venta de 5-10 % y costo de alimentación de 10-30 % se combinan, en los cuales la relación B/C fluctúa entre 1.2 y 1.4, teniendo una tendencia a disminuir la rentabilidad cuando aumenta el precio de alimento en el nivel más alto estimado (30 %) sobre los costos de producción. El análisis de rentabilidad por ciclo anual (Tabla 3) indica que hay variaciones en los porcentajes de la biomasa obtenida, en la ganancia marginal total, en la relación B/C, en la producción de equilibrio y en la ganancia bruta a favor de la estrategia de alimentación C (3H:2L). Esta tendencia está bien documentada en la literatura, al respecto destaca la revisión realizada por Ali *et al.* (2003) en donde se hace una revisión profunda del por qué los animales crecen a tasas por debajo de su capacidad fisiológica. Estos elementos son el fundamento del proceso de selección de las variables estudiadas en el bioensayo de crecimiento y en las evaluaciones de rentabilidad del cultivo de *O. niloticus* desarrollado en los modelos de las Tablas 2, 3 y 4 respectivamente.

Los modelos de análisis tradicional del NPV se centran en la rentabilidad de una determinada unidad de negocios, mientras que un análisis del beneficio/costo tiene un alcance mucho más amplio. La relación B/C es un indicador común que se utilizan en la elaboración de presupuestos de capital para determinar la rentabilidad de una propuesta de inversión, por lo tanto, una inversión es rentable si la relación B/C es mayor que 1 (Phiri & Xuan, 2018). En este sentido los resultados de los análisis de rentabilidad (Tabla 4) presentan valores positivos, los cuales permiten establecer un costo de producción por tonelada de \$ 2.13 miles de dólares, además una ganancia bruta por tonelada de biomasa de \$ 0.94 miles de dólares estableciendo como se determinó en la línea base del cálculo con un precio de \$ 2.24 dólares/kg de tilapia producido. Este margen de utilidad se ve modificado positivamente y negativamente en las proyecciones de los escenarios 1 al 6 (recuadro de la Tabla 4), a pesar de ello, se determinaron utilidades teóricas para la ganancia bruta por tonelada entre \$ 0.80 y \$ 1.16 miles de dólares considerando que hubo incrementos de \$

were increases of \$ 2.23 to \$ 2.43 thousand of dollars in production costs of the biomass. These results could be positive from a biological point of view based on benefit/cost ratio analysis, since increasing profits could be obtained between 20 % and 40 % for each invested dollar. To our knowledge, this is the first study focusing on determining benefit/cost ratio of the intensive production of tilapia juveniles in greenhouse from a biological point of view. However, a deeper analysis is required involving aspects like environmental costs, aggregated value, feeding strategies, types of bio-flocs and aquaponics systems as sustainable models.

Conclusions

Nile tilapia juveniles did not present a phenomenon of protein sparing for growth depending on protein/energy levels from 18 to 21 kg/MJ, however, a thermal growth coefficient of 11.33 allowed to establish an adequate projection of the daily weight gain of tilapia based on a feeding rate of 3.61 g/tilapia/day, without affecting economic profit index of the feed. The production of *O. niloticus* determined by the benefit/cost ratio of the project showed positive figures with an increase of 26 % in the economic return rate when using a three-day feeding strategy with high-protein diets and a two days-feeding with a low-protein diet with regards to the one-day alternate feeding strategy with the high-protein diet and one day with the low-protein diet. The different production scenarios calculated with the current net value and the benefit/cost ratio contributed with positive figures at the end of a five-year period, therefore, the utility of this model is feasible for the intensive production of juveniles up to an average weight of 150 g with 6 rearing cycles per year of production.

Acknowledgments

Research carried out with the financial support of the UAN-PTC-053 project of the Teacher Professional Development Program of the Secretariat of Public Education of Mexico. The authors thank the National Council of Science and Technology of Mexico for the scholarship granted to the seventh author, No. 740161, and also to the Postgraduate in Agricultural Biological Sciences of the Autonomous University of Nayarit for financial support.

2.23 a \$ 2.43 miles de dólares en los costos de producción de la biomasa. Estos resultados podrían ser positivos desde un punto de vista biológico en base al análisis de la relación beneficio/costo ya que por cada dólar invertido se tendrían utilidades incrementales entre un 20 % y 40 %. Hasta nuestro conocimiento, este es el primer estudio enfocado en determinar el beneficio/costo de la producción intensiva de juveniles en invernadero desde un punto de vista biológico. Sin embargo, se requiere un análisis más profundo que involucren aspectos como costos ambientales, valor agregado, estrategias de alimentación, tipos de bioflocs y sistemas acuapónicos como modelos sustentables.

Conclusiones

Los juveniles de tilapia nilótica no presentan un fenómeno de ahorro de proteína para crecimiento en función de niveles de proteína/energía de 18 a 21 kg/MJ, sin embargo, el coeficiente térmico de crecimiento de 11.33 permite establecer una adecuada proyección de la ganancia diaria de peso de la tilapia en función de una tasa de alimentación de 3.61 g/tilapia/día, sin afectar el índice de rentabilidad económica del alimento. La producción de *O. niloticus* determinada por la relación beneficio/costo relación beneficio/costo del proyecto muestran cifras positivas con un incremento del 26 % en la tasa de retorno económico al utilizar una estrategia de tres días de alimentación con dieta alta en proteína y dos días de alimentación con una dieta baja en proteína respecto a la estrategia de alimentación alternada de un día con alimentación alta en proteína y un día con alimentación baja en proteína. Los diferentes escenarios de producción calculados con el valor actual neto y la relación beneficio/costo aportan cifras positivas al final de un periodo de 5 años, por lo tanto la utilidad de este modelo es factible para la producción intensiva de juveniles hasta un peso promedio de 150 g con 6 ciclos de cultivo por cada año de producción.

Agradecimientos

Investigación realizada con el apoyo financiero del proyecto UAN-PTC-053 del Programa para el Desarrollo Profesional Docente de la Secretaría de Educación Pública de México. Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por la beca de maestría otorgada No. 740161 al séptimo autor y también al Posgrado en Ciencias Biológicas Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Nayarit por el soporte económico.

References

- AOAC (Association of Official Analytical Chemist). (2006). In: Official methods of analysis of AOAC International. 2 Vols. 16th Edn, AOAC, Inc. Arlington, VA, USA. Association of Analytical Communities.
- Abdel-Tawwab, M., Khattab, Y. A., Ahmad, M. H. and Shalaby, A. M. (2008). Compensatory Growth, Feed Utilization, Whole-Body Composition, and Hematological Changes in Starved Juvenile Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Journal of Applied Aquaculture*, 18: (3): 17-36. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1300/J028v18n03_02
- Adakli, A. & Taşbozan, O. (2015). The effects of different cycles of starvation and refeeding on growth and body composition on European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 15(3): 419-427. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v15_2_28
- Adewolu, M. A. & Adoti, A. J. (2010). Effect of mixed feeding schedules with varying dietary crude protein levels on the growth and feed utilization of *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) fingerlings. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 5(4): 304-310. <https://doi.org/10.3923/jfas.2010.304.310>
- Ali, M., Nicieza, A. and Wootton, R. J. (2003). Compensatory growth in fishes: a response to growth depression. *Fish and fisheries*, 4(2): 147-190. <https://doi.org/10.1046/j.1467-2979.2003.00120.x>
- Azevedo, P. A., Bureau, D. P., Leeson, S. and Cho, C. Y. (2002). Growth and efficiency of feed usage by Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets with different dietary protein: energy ratios at two feeding levels. *Fisheries science*, 68(4): 878-888. https://www.jstage.jst.go.jp/article/fishsci1994/68/4/68_4_878/_pdf
- Baras, E., Mpo’N’Tcha, A., Driouch, H., Prignon, C. and Mélard, C. (2002). Ontogenetic variations of thermal optimum for growth, and its implication on thermolabile sex determination in blue tilapia. *Journal of Fish Biology*, 61(3): 645-660. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2002.tb00902.x>
- Besson, M., Vandeputte, M., Van Arendonk, J. A. M., Aubin, J., De Boer, I. J. M., Quillet, E. and Komen, H. (2016). Influence of water temperature on the economic value of growth rate in fish farming: the case of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) cage farming in the Mediterranean. *Aquaculture*, 462(1): 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.04.030>
- Bolivar, R. B., Jimenez, E. B. T., and Brown, C. L. (2006). Alternate-day feeding strategy for Nile tilapia grow out in the Philippines: marginal cost-revenue analyses. *North American Journal of Aquaculture*, 68(2): 192-197. <https://doi.org/10.1577/A05-012.1>
- Cheng, Z., Li, J., Zhang, B., Fang, Z., Sun, J., Bai, D., Sun, J. and Qiao, X. (2017). Verification of protein sparing by feeding carbohydrate to common carp *Cyprinus carpio*. *Chinese journal of oceanology and limnology*, 35(2): 251-257. <https://doi.org/10.1007/s00343-016-5332-6>
- Diogenes, A. F., Fernandes, J. B. K., Dorigam, J. C. P., Sakomura, N. K., Rodrigues, F. H. F., Lima, B. T. M. and Gonçalves, F. H. (2016). Establishing the optimal essential amino acid ratios in juveniles of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by the deletion method. *Aquaculture nutrition*, 22(2): 435-443. <https://doi.org/10.1111/anu.12262>
- Dobson, S. H. & Holmes, R. M. (1984). Compensatory growth in the rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson. *Journal of Fish Biology*, 25(6): 649-656. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1984.tb04911.x>
- El-Sayed, Abdel-Fattah M. & Teshima, S. I. (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)
- FAO (2016). The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Rome. 200 pp. ISBN 978-92-5-109185-2. <http://www.fao.org/publications>
- FAO (2018). The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 - Meeting the sustainable development goals. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <http://www.fao.org/documents/card/es/c/I9540EN/>
- Francis, D. S. & Turchini, G. M. (2017). Retro-engineering the protein sparing effect to preserve n-3 LC-PUFA from catabolism and optimize fish oil utilization: A preliminary case study on juvenile Atlantic salmon. *Aquaculture*, 468(2017): 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.10.013>
- Gabriel, N. N., Omoregie, E., Tijipute, M., Kukuri, L. and Shilombwelwa, L. (2017). Short-term cycles of feed deprivation and refeeding on growth performance, feed utilization, and fillet composition of hybrid tilapia (*Oreochromis mossambicus* x *O. niloticus*). *The Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh*, 1344(69): 1-7. http://evols.library.manoa.hawaii.edu/bitstream/10524/56832/1/IJA_69.2017.1344.Gabriel.pdf

- Gabriel, N. N., Omoregi, E., Martin, T., Kukuri, L. and Shilombwelwa, L. (2018). Compensatory Growth Response in *Oreochromis mossambicus* Submitted to Short-Term Cycles of Feed Deprivation and Refeeding. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(1): 161-166. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v18_1_18
- Gaylord, T. G. & Gatlin III, D. M. (2001). Dietary protein and energy modifications to maximize compensatory growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture*, 194(3-4): 337-348. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00523-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00523-8)
- Gutiérrez, R., Uriarte, I., Yany, G. and Fariás, A. (2015). Productive performance of juvenile Patagonian red octopus (*Enteroctopus megalocyathus*) fed with fresh preys: are relevant the quantity of protein and energy on diets? *Aquaculture Research*, 46(S1): 64-75. <https://doi.org/10.1111/are.12585>
- Haidar, M. N., Bleeker, S., Heinsbroek, L. T. N. and Schrama, J. W. (2018). Effect of constant digestible protein intake and varying digestible energy levels on energy and protein utilization in Nile tilapia. *Aquaculture*, 489(20): 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.035>
- Janssen, K., Berentsen, P., Besson, M. and Komen, H. (2017). Derivation of economic values for production traits in aquaculture species. *Genetics Selection Evolution*, 49(5): 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0278-x>
- Jantrarat, W., Sitasit, P., Jantrarat, P., Viputhanumas, T. and Srabua, P. (1998). Protein and energy levels for maximum growth, diet utilization, yield of edible flesh and protein sparing of hybrid *Clarias* catfish (*Clarias microcephalus* × *Clarias gariepinus*). *Journal of the World Aquaculture Society*, 29(3): 281-289. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1998.tb00648.x>
- Jauralde, I., Martínez-Llorens, S., Tomás, A., Ballestrazzi, R. and Jover, M. (2011). A proposal for modelling the thermal-unit growth coefficient and feed conversion ratio as functions of feeding rate for gilthead sea bream (*Sparus aurata*, L.) in summer conditions. *Aquaculture Research*, 44(2): 242-253. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.03027.x>
- Jiang, S., Wu, X., Luo, Y., Wu, M., Lu, S., Jin, Z. and Yao, W. (2016). Optimal dietary protein level and protein to energy ratio for hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*♀ × *Epinephelus lanceolatus*♂) juveniles. *Aquaculture*, 465(2016): 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.08.030>
- Kabir, K. A., Schrama, J. W., Verreth, J. A. J., Phillips, M. J. and Verdegem, M. C. J. (2018). Effect of dietary protein to energy ratio on performance of Nile tilapia and food web enhancement in semi-intensive pond aquaculture. *Aquaculture*, 499 (15): 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.038>
- Kaliba, A. R., Osewe, K. O., Senkondo, E. M., Mnembuka, B. V. and Quagrainie, K. K. (2006). Economic analysis of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) production in Tanzania. *Journal of the World Aquaculture Society*, 37(4): 464-473. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2006.00059.x>
- Kam, L. E., Leung, P. and Ostrowski, A. C. (2003). Economics of offshore aquaculture of Pacific threadfin (*Polydactylus sexfilis*) in Hawaii. *Aquaculture*, 223(1-4): 63-87. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00162-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00162-5)
- Kaushik, S. J., Doudet, T., Médale, F., Aguirre, P. and Blanc, D. (1995). Protein and energy needs for maintenance and growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Journal of Applied Ichthyology*, 11(3-4): 290-296. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.1995.tb00029.x>
- Liu, W., Lu, X., Jiang, M., Wu, F., Tian, J., Yang, C. Yu, L. and Wen, H. (2018). Effects of dietary manipulation on compensatory growth of juvenile genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish physiology and biochemistry*, 45(1): 21-32. <https://doi.org/10.1007/s10695-018-0531-z>
- Lozano, N. B. S., Vidal, A. T., Martínez-Llorens, S., Mérida, S. N., Blanco, J. E., López, A. M., Torres, M. P. and Cerdá, M. J. (2007). Growth and economic profit of gilthead sea bream (*Sparus aurata*, L.) fed sunflower meal. *Aquaculture*, 272(1-4): 528-534. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.07.221>
- Lupatsch, I., Kissil, G. W., Sklan, D. and Pfeffer, E. (2001). Effects of varying dietary protein and energy supply on growth, body composition and protein utilization in gilthead seabream (*Sparus aurata* L.). *Aquaculture Nutrition*, 7(2): 71-80. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2001.00150.x>
- Lutz, C. G. & Kennetz, J. R. (1998). Investment and management aspects of owner/operator scale greenhouse tilapia systems. In *Proceeding of the International Conference on Recirculating Aquaculture* (pp. 98-105).
- Moksness, E., Støle, R. and van der Meer, G. (1998). Profitability analysis of sea ranching with Atlantic salmon (*Salmo salar*), Arctic charr (*Salvelinus alpinus*), and European lobster (*Homarus gammarus*) in Norway. *Bulletin of Marine Science*, 62(2): 689-699. <https://www.ingentaconnect.com/content/umrsmas/bullmar/1998/00000062/00000002/art00024>
- Molina, R., Cerda, R., González, E. and Hurtado, F. (2012). Simulation model of the scallop (*Argopecten purpuratus*) farming

- in northern Chile: some applications in the decision making process/Modelo de simulación para el cultivo del ostión (*Argopecten purpuratus*) en el norte de Chile: aplicaciones para la toma de decisiones. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(3): 679-693. <https://www.redalyc.org/pdf/1750/175024151017.pdf>
- Montoya-Camacho, N., Oloño, J. T. H., Ríos, E. M., Rodríguez-Félix, F., Torres-Arreola, W., Yañez, F. J. C., Canizales-Rodríguez, D. F. and Higuera, V. M. O. (2018). Efecto de la sustitución de proteína animal por vegetal en el alimento sobre la fisiología de la tilapia del Nilo. *Biocencia*, 20(2): 37-42. <https://biocencia.unison.mx/index.php/biocencia/article/view/598>
- Nasr-Allah, A. M., Dickson, M. W. and Al-Kenawy, D. A. R. (2014). Technical characteristics and economic performance of commercial tilapia hatcheries applying different management systems in Egypt. *Aquaculture*, 426(427): 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.02.004>
- Omasaki, S. K., Janssen, K., Besson, M. and Komen, H. (2017). Economic values of growth rate, feed intake, feed conversion ratio, mortality and uniformity for Nile tilapia. *Aquaculture*, 481: 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.013>
- Perea-Román, C., Garcés-Caicedo, Y. J., Muñoz-Arboleda, L. S., Hoyos-Concha, J. L. and Gómez-Peñaranda, J. A. (2018). Valoración económica del uso de ensilaje de residuos piscícolas en la alimentación de *Oreochromis* spp. *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(1): 43-51. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biociologia/article/view/1141>
- Phiri, F. & Yuan, X. (2018). Economic Profitability of Tilapia Production in Malawi and China. *Journal Aquaculture Research and Development*, 9(535): 1-6. <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000535>
- Ponzoni, R. W., Nguyen, N. H. and Khaw, H. L. (2007). Investment appraisal of genetic improvement programs in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 269: 187-199. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.04.054>
- Poot-López, G. R., Hernández, J. M. and Gasca-Leyva, E. (2014). Analysis of ration size in Nile tilapia production: Economics and environmental implications. *Aquaculture*, 420-421: 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.005>
- Rasool, I., Jain, K. K., Sahu, N. P., Sahoo, S., Gora, A. H., Rehman, S. and Dar, S. A. (2018). Evaluation of dietary protein to carbohydrate ratio on the growth, conversion efficiencies and body composition of Zebrafish. *Journal of Entomologia and Zoology Studies* 6(2): 2254-2258 <http://www.entomoljournal.com/archives/2018/vol6issue2/PartY/6-2-35-216.pdf>
- Ridha, M. T. & Cruz, E. M. (2001). Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. reared in a simple recirculating system. *Aquacultural Engineering*, 24(2): 157-166. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(01\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00060-7)
- Sabbag, O. J., Takahashi, L. S., Silveira, A. N. and Aranha, A. S. (2011). Costs and economic viability of production of the lambari tetra in Monte Castelo, São Paulo State: a case study. *Boletim do Instituto de Pesca*, 37(3): 307-315. https://www.pesca.sp.gov.br/boletim/index.php/bip/article/view/37_3_307-315
- Sokal, R. R. & Rohlf, F. J. (1995). *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. (W.H. Freeman and Co.), 3rd Edn. New York, USA. p. 887.
- Sweilum, M. A., Abdella, M. M. and Salah El-Din, S. A. (2005). Effect of dietary protein-energy levels and fish initial sizes on growth rate, development and production of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *Aquaculture research*, 36(14): 1414-1421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01362.x>
- Tian, X. & Qin, J. G. (2003). A single phase of food deprivation provoked compensatory growth in barramundi *Lates calcarifer*. *Aquaculture*, 224(1-4): 169-179. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00224-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00224-2)
- Trọng, T. Q., Mulder, H. A., van Arendonk, J. A. and Komen, H. (2013). Heritability and genotype by environment interaction estimates for harvest weight, growth rate, and shape of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) grown in river cage and VAC in Vietnam. *Aquaculture*, 384: 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.12.022>
- Wang, Y., Cui, Y., Yang, Y. and Cai, F. (2000). Compensatory growth in hybrid tilapia, *Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*, reared in seawater. *Aquaculture*, 189(1-2): 101-108. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00353-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00353-7)
- Watanabe, W. O., Losordo, T. M., Fitzsimmons, K. and Hanley, F. (2002). Tilapia production systems in the Americas: technological advances, trends, and challenges. *Reviews in fisheries science*, 10(3-4): 465-498. <https://doi.org/10.1080/20026491051758>

- Weihe, R., Dessen, J. E., Arge, R., Thomassen, M. S., Hatlen, B. and Rørvik, K. A. (2018). Improving production efficiency of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) by isoenergetic diets with increased dietary protein-to-lipid ratio. *Aquaculture Research*, 49(4): 1441-1453. <https://doi.org/10.1111/are.13598>
- Wu, B., Xiong, X., Xie, S. and Wang, J. (2016). Dietary lipid and gross energy affect protein utilization in the rare minnow *Gobiocypris rarus*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 34(4): 740-748. <https://doi.org/10.1007/s00343-016-5350-4>