

Efectos de proteína vegetal en el crecimiento y respuesta inflamatoria en trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) de dos centros de producción en México

Effects of plant protein on growth and inflammatory response in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) from two productions centers in Mexico

Vania A. Ortíz-González¹, Erick U. Santamaría-Ventura¹, J. Manuel Segura-Campos¹, Mario A. Fernández-Araiza¹, Madison S. Powell², L. Héctor Hernández-Hernández¹

Recibido: 04 de octubre del 2024.

Aceptado: 15 de abril del 2025.

Publicado: abril de 2026.

RESUMEN

Antecedentes: Ante la demanda de harina de pescado y aumento de los precios, se propone el uso de proteínas de origen vegetal. El uso de concentrados de proteína vegetal y la selección genética de organismos son estrategias para sustituir completamente los productos derivados de pescado en los alimentos para trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). **Objetivo:** Determinar el efecto de un alimento con diferentes concentrados de proteína vegetal en el crecimiento y la expresión de las interleucinas 1 β , 8, 4 y 10 en crías de trucha provenientes de dos centros de producción acuícola en México. **Métodos:** Se realizó una prueba de alimentación con crías de dos orígenes, El Zarco (Estado de México, peso inicial 3.04 \pm 0.3 g) y Los Manantiales (Puebla, peso inicial 0.84 \pm 0.2 g) por un periodo de 60 días, utilizando un alimento con proteína vegetal (arroz, chícharo, maíz y soya), además de un alimento comercial como control. Al finalizar, se determinó el crecimiento y la expresión de los genes *il-1 β* , *il-4*, *il-8* e *il-10* en el intestino. Los datos de crecimiento y expresión de genes se evaluaron con un ANDEVA de dos variables. **Resultados:** El crecimiento fue significativamente más bajo en los organismos alimentados con las proteínas vegetales, independientemente del origen. Los genes de las interleucinas proinflamatorias (*il-1 β* e *il-8*) fueron regulados positivamente en los organismos con el alimento vegetal, pero las antiinflamatorias (*il-4* e *il-10*) mostraron valores de expresión positiva más altos en las crías de El Zarco con el alimento vegetal. **Conclusiones:** El alimento con proteína de origen vegetal afectó el crecimiento de los organismos de ambos orígenes, pero la expresión positiva de *il-4* e *il-10* en las crías de El Zarco, sugiere una recuperación de un proceso inflamatorio.

¹ Laboratorio de Producción Acuicola, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida de los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México, C.P. 54090, México

² Hagerman Fish Culture Experiment Station, Aquaculture Research Institute, University of Idaho, 3059F National Fish Hatchery Road, Hagerman, Idaho, 83332, USA

***Corresponding author:**

Luis Héctor Hernández Hernández: e-mail: luish3@yahoo.com

Palabras clave: crecimiento, concentrados de proteína vegetal, inflamación, interleucinas, harina de soya

To quote as:

Ortíz-González, V. A., E. U. Santamaría-Ventura, J. M. Segura-Campos, M. A. Fernández-Araiza, M. S. Powell & L. H. Hernández-Hernández. 2026. Efectos de proteína vegetal en el crecimiento y respuesta inflamatoria en trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) de dos centros de producción en México. *Hidrobiológica* 36 (1): 11-17.

DOI:revHidro/article/view/1804

ABSTRACT

Background: Due to the demand for fish meal and increasing prices, use of plant-origin proteins has been proposed. The use of plant-protein concentrates and the genetic selection of organisms are strategies to substitute completely fish derived-products in feeds for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Objective:** To determine the effect of one feed with different plant protein concentrates on growth and expression of interleukins 1 β , 8, 4 and 10 of rainbow trout fingerlings obtained from two aquatic production centers in Mexico. **Methods:** A feeding trial was performed with fingerlings from two sources, El Zarco (Estado de México, initial weight of 3.04 \pm 0.3 g) and Los Manantiales (Puebla, initial weight of 0.84 \pm 0.2 g) for a period of 60 days, using a feed with plant protein (rice, green pea, corn and soybean), in addition to a commercial feed as control. At the end of the trial, growth performance and gene expression of *il-1 β* , *il-4*, *il-8* and *il-10* in the intestine were determined. Growth and gene expression data were evaluated with a two-way ANOVA. **Results:** Growth was significantly lower in the organisms fed with the plant proteins, independently of the origins. The proinflammatory interleukins genes (*il-1 β* and *il-8*) were upregulated in the organisms with the plant feed, but the anti-inflammatory interleukins genes (*il-4* and *il-10*) showed higher upregulation in the fingerlings from El Zarco with plant feed. **Conclusions:** The feed with the plant-origin concentrates affected the growth of the organisms from both origins, but the upregulation of *il-4* and *il-10* in the fingerlings from the El Zarco, suggests a recovery of an inflammatory process.

Keywords: growth, plant-protein concentrates, inflammation, interleukins, soybean meal

INTRODUCCIÓN

La trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792) es una de las especies con más tradición en la producción acuícola de México, ya que su cultivo data desde mediados del siglo pasado en el Estado de México (Hernández-Hernández y Carrillo-Longoria, 2018) y actualmente se produce en 18 estados del país (CONAPESCA, 2022). Sin embargo, la producción de esta especie enfrenta problemáticas diversas y el alimento balanceado es uno de los factores que más afecta a los productores, debido a un constante aumento de precios en los insumos para su elaboración (Hernández-Hernández y Carrillo-Longoria, 2018). Los principales ingredientes de los alimentos balanceados son la harina y el aceite de pescado, que provienen de pesquerías marinas y aunque su producción permanece relativamente estable (Hardy, 1996), es insuficiente para la creciente demanda de la acuicultura (Gattiin *et al.*, 2007). Ante esta situación, se ha propuesto el uso de productos de origen vegetal tales como las harinas y aceites de cereales y semillas oleaginosas (Hardy, 2010). Las proteínas vegetales todavía tienen un uso limitado en alimentos comerciales de especies acuáticas carnívoras como la trucha, pues los cereales y las semillas contienen compuestos que afectan la integridad del epitelio intestinal, la digestibilidad, el crecimiento normal (Krogdahl *et al.*, 2010) y la respuesta inmunológica e inflamatoria (Burrells *et al.*, 1999). Se han desarrollado varias estrategias para incluir cantidades cada vez mayores de proteínas de origen vegetal en los alimentos de peces carnívoros y una de ellas es el uso de productos refinados de las harinas vegetales, que contienen una mayor cantidad de proteína y los más prometedores para usarse en los organismos acuáticos de importancia comercial son los concentrados de proteína (Hardy, 2010). Algunos trabajos previos reportan el uso de diferentes concentrados de proteína vegetal (como de soya, arroz, maíz) en trucha arcoíris y encontrando un crecimiento similar con el grupo control (Cid *et al.*, 2020; Segura-Campos *et al.*, 2021). Así mismo, se ha propuesto la selección de organismos con capacidad de utilizar las proteínas de origen vegetal sin afectar el crecimiento y sin generar inflamación en la parte distal del intestino (Overturf *et al.*, 2004; Lazzaroto *et al.*, 2015; Abernathy *et al.*, 2017; Blaufuss *et al.*, 2020). Considerando estos dos aspectos, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar el efecto de un alimento con proteína vegetal en el crecimiento y en la expresión de las interleucinas proinflamatorias 1 β y 8 y de las antiinflamatorias 4 y 10, en crías de trucha arcoíris provenientes de dos diferentes centros de producción ubicados en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Formulación del alimento. Se formuló un alimento (Tabla 1) con exclusivamente proteínas de origen vegetal: concentrado de proteína de chícharo, de arroz (GABSA S.A. de C.V., Ciudad de México, México), gluten de maíz (Glutimex, Ingredion México S.A de C.V., Tlalneantla, Estado de México) y harina de soya (PISA S.A. de C.V., Guadalajara, México). Otros ingredientes se muestran en la Tabla 1. El alimento se preparó de acuerdo a lo reportado previamente por Segura-Campos *et al.* (2021). Como control, se utilizó un alimento comercial (minipelet peces AE 1.5 mm, Alimentos de Alta Calidad El Pedregal, S.A de C.V.; contenido químico proximal: proteína, 45%; lípidos, 16%; cenizas 12.5% y humedad, 12%).

Organismos experimentales. Los organismos se obtuvieron de dos centros de producción acuícola: granja “Los Manantiales” (municipio

de Zacatlán, Puebla) y del Centro de Producción “El Zarco” (municipio de Ocoyoacac, Estado México). De acuerdo con los encargados de cada uno de estos centros, las crías de Los Manantiales provenían de la cruce de machos criollos mantenidos en la granja por varios años y hembras importadas en el 2022 desde Dinamarca; mientras que las de El Zarco, eran resultado de la cruce de reproductores obtenidos del Centro de Producción Acuícola de Pucuoato, Michoacán y de Atlixco, Puebla en México. Los organismos se trasladaron al Laboratorio de Producción Acuícola de UNAM FES Iztacala y se colocaron en tanques de 1000 L para un periodo de aclimatación de 15 días y se mantuvieron con un alimento comercial (minipelet peces AE 1.5 mm, Alimentos de Alta Calidad El Pedregal, S.A de C.V.).

Prueba de alimentación. Se utilizó un sistema de recirculación con un total de 12 tanques de polipropileno de 100 L. Cada alimento (el experimental con las proteínas de origen vegetal y el control, que fue el comercial) se ofreció a cada uno de los orígenes por triplicado. El peso inicial promedio (\pm error estándar) para cada uno de los orígenes fue de 3.04 ± 0.3 g para El Zarco y de 0.84 ± 0.2 g para Los Manantiales. La ración diaria fue del 7% del total de la biomasa del tanque, dividida en dos porciones que se ofrecieron a las 9:00 y 16:30 horas. Los organismos se pesaron cada 10 días y la ración diaria se ajustó de acuerdo con el nuevo peso. Durante la prueba, las condiciones ambientales fueron las siguientes: oxígeno disuelto, 5.0 ± 0.1 mg/L; nitrógeno amoniacal, 0.01 ± 0.001 mg/L; pH, 8.1 ± 0.2 y ciclo de luz-oscuridad de 12:12 horas. La prueba tuvo una duración de 60 días y posteriormente, los organismos se mantuvieron en ayuno por 24 h y después se pesaron para obtener el crecimiento. Para los análisis de expresión de genes, 5 organismos por cada uno de los orígenes y por cada alimento, fueron tomados aleatoriamente y se sacrificaron con una sobredosis de aceite de clavo para obtener las muestras de la porción distal del intestino, las cuales se colocaron en tubos de plástico de 1.5 ml con el reactivo de TRIzol (Invitrogen, Carlsbad, EEUU) y se almacenaron a -80°C hasta su análisis.

Crecimiento. Se determinaron los siguientes parámetros de crecimiento (NCR, 2011):

Peso final (g).

Ganancia en peso (%), $GP = ((\text{Peso final} - \text{Peso inicial}) / (\text{Peso inicial})) \times 100$.

Tasa de crecimiento específico (%día), $TCE = (\ln[\text{Peso final}] - \ln[\text{Peso inicial}]) / 60 \times 100$.

Expresión de genes. La determinación de la respuesta inflamatoria en la parte distal del intestino de cada individuo y se realizó mediante la expresión de los genes de algunas interleucinas y para ello, el ARN total de las muestras de la parte distal del intestino se extrajo de acuerdo con Blaufuss *et al.* (2020) y se cuantificaron con un kit (RNA BR assay, Invitrogen, Carlsbad, EEUU) en un fluorómetro Qubit 4 (Invitrogen, Carlsbad, EEUU). Las muestras se diluyeron en agua libre de nucleasas para obtener la misma concentración de ARN y tratarlas con una DNasa (DNase I, Invitrogen, Carlsbad, USA) para eliminar la ADN genómico. Finalmente, las muestras se utilizaron para sintetizar el ADN complementario con un kit (High-capacity cDNA reverse transcription kit, ThermoFisher Scientific, Waltham, EEUU) de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Las muestras se amplificaron por duplicado en microtubos de 0.1 ml en un sistema RT-PCR MyGo mini (IT-IS International, Stokesly, Inglaterra) y SensiFAST SYBER no-ROX (Meridian Bioscience, Memphis, EEUU). Las condiciones de la PCR fueron: 95°C por 2 minutos, seguido de 40 ciclos

a 95 °C por 5 s y 60 °C por 30 s. Se realizó una curva de fusión con incrementos de 0.5 °C desde 60 °C hasta 95 °C en cada reacción para verificar la especificidad del ensayo. Los genes que se determinaron fueron los de las interleucinas (IL) 1β, 4, 8 y 10 y como gen de referencia se utilizó el de la proteína ácida PO ribosomal 60S (ARPB). Los primers utilizados para las reacciones de amplificación de RT-PCR se muestran en la Tabla 2: los de *il-4*, *il-8*, *il-10* y *arbp* se diseñaron para no amplificar en las regiones intrón del gen, mientras que los primers de la *il-1β* fueron reportados por Veléz-Carabria *et al.* (2021). El gen de referencia se utilizó para normalizar y cuantificar la expresión mediante la metodología de ΔΔCt reportada por Livak y Schmittgen (2001).

Análisis estadísticos. Los datos de crecimiento (PF, GP, TCE), supervivencia y de expresión de los diferentes genes se probaron para normalidad y homocedasticidad con las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Levene, respectivamente. Los datos mostraron ser normales y homocedásticos, por lo que se realizó un ANDEVA de dos variables para evaluar las diferencias significativas entre las medias y la interacción entre el origen y la dieta (Zar, 1999). Cuando se detectaron diferencias significativas ($P < 0.05$) se determinaron con prueba LSD de Fisher utilizando el programa Prism v. 10.3.1 (GraphPad, San Diego, EEUU).

RESULTADOS

El crecimiento de los organismos se muestra en la Figura 1 y no se observaron diferencias significativas en el Peso Final (PF, Figura 1a), aunque los organismos de ambos orígenes y que recibieron el alimento Control, mostraron valores más altos. Se observó que el origen y la dieta afectaron significativamente a la Ganancia en Peso (GP, Figura 1b) y la Tasa de Crecimiento Específico (TCE, Figura 1c), mostrando valores más altos en los organismos provenientes de Los Manantiales en ambos índices. En particular, la GP de las crías provenientes de Los Manantiales y alimentadas con la dieta Control mostró un valor significativamente más alto que aquellas alimentadas con las proteínas de origen vegetal. En los organismos de El Zarco, no se observaron diferencias entre el grupo control y el alimentado con la dieta con proteínas vegetales. Respecto a la TCE, fue significativamente más alta en el grupo Control de Los Manantiales cuando se comparó con los alimentado con la proteína vegetal del mismo origen. De la misma forma, en los organismos de El Zarco los valores de TCE fueron significativamente diferentes entre el grupo Control y el Vegetal.

Tabla 1. Formulación del alimento con proteínas de origen vegetal.

Ingredientes	g/kg
Concentrado de proteína de chicharro	188
Concentrado de proteína de arroz	241
Gluten de maíz	84
Harina de soya	125
Aceite de pescado	35
Mezcla de aceites vegetales	35
Lecitina de soya	50
Almidón de papa	100
Mezcla de vitaminas y minerales	40
Aglutinante	50
α-celulosa	52
Composición proximal	
Proteína cruda ¹	48.7
Lípidos ¹	12.1
Cenizas ¹	8.9
Humedad ²	2.2

¹% en base seca

²%

La expresión de los genes de las interleucinas proinflamatorias, *il-1β* e *il-8*, en la parte distal del intestino se muestran en la Figura 2 a y b, respectivamente. La expresión del gen *il-1β* fue regulada positivamente por el alimento con las proteínas de origen vegetal en los organismos de ambos centros de producción, y aunque se observó un valor más alto en Los Manantiales, no se observaron diferencias entre las medias. Por lo que respecta a las crías del grupo Control de ambos orígenes, mostraron una expresión de *il-1β* similar al gen de referencia (*arbp*). La expresión de *il-8* tuvo un comportamiento similar al observado en la de *il-1β*, con valores más altos en los organismos del tratamiento vegetal de ambos orígenes, aunque no se encontraron diferencias significativas considerando el origen y la fuente de alimento. Se observó expresión positiva de los tratamientos Vegetal, pero fue mayor en los organismos provenientes de El Zarco. También se observó la expresión positiva en las truchas de El Zarco mantenidas con el tratamiento Control.

Tabla 2. Secuencia de los primers utilizados en las reacciones de amplificación de RT-PCR.

Gen	Acceso en Genebank	Primers
<i>il-1β</i>	AJ223954	f. ACA TTG CCA ACC T CA TCA TCG
		r. TTG AGC AGG TCC TTG TCC TTG
<i>il-4</i>	AB574337	f. ACC ACC ACA AAG TGC AAG GAG TTC T
		r. CAC CTG GTC TTG GCT CTT CAC AAC
<i>il-8</i>	AJ279069	f. CTC GCA ACT GGA CTG ACA AA
		r. TGG CTG ACA TTC TGA TGC TC
<i>il-10</i>	AB118099	f. GGA TTC TAC ACC ACT TGA AGA GCC C
		r. GTC GTT GTT GTT CTG TGT TCT GTT GT
<i>arbp</i>	AJ438158.1	f. GCT GTA AAA GCG ATC CTT CG
		r. ATT GTC TGC ACC CAC AAT GA

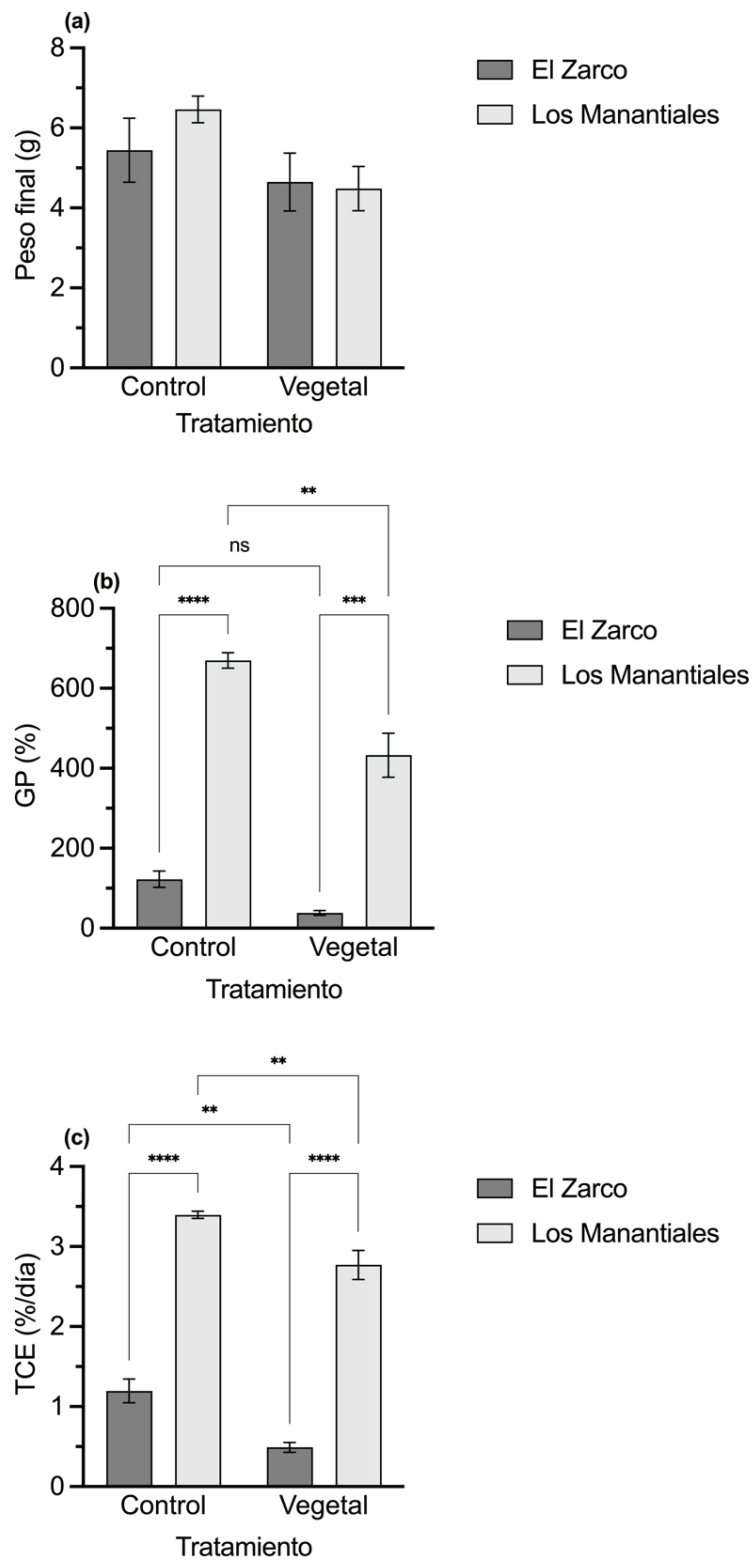


Figura 1a-c. Peso final (a), ganancia en peso (b) y tasa de crecimiento específico (c) crías de trucha arcoiris alimentadas con concentrados de proteína vegetal y provenientes de dos centros de producción en México. Cada columna representa el promedio de tres repeticiones ± error estándar. Las columnas con diferente número de asteriscos, difieren significativamente ($P < 0.05$).

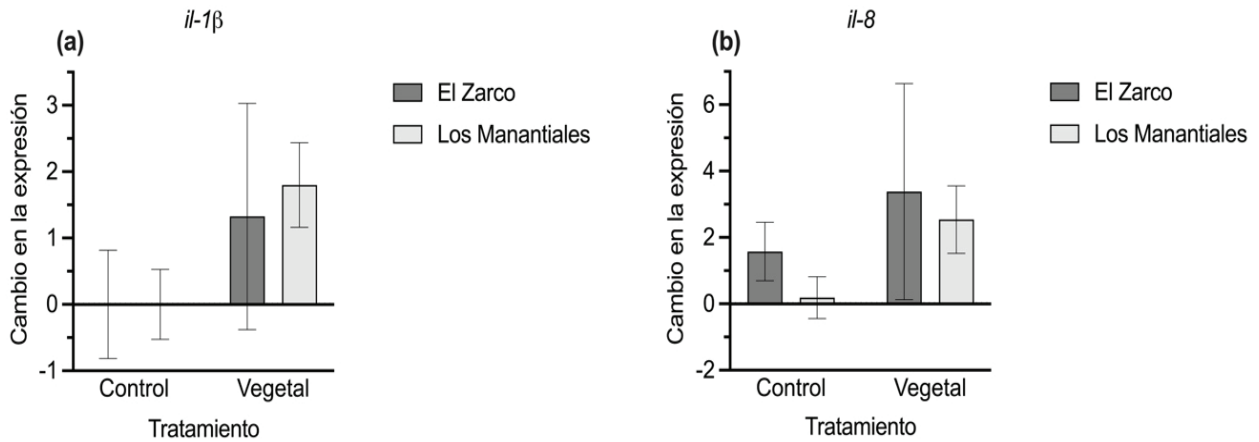


Figura 2a-b. Expresión de los genes *il-1β* (a) e *il-8* (b) en la zona distal del intestino de crías de trucha arcoíris alimentadas con concentrados de proteína vegetal y provenientes de dos centros de producción en México. Cada columna representa el promedio de tres repeticiones ± error estándar. No se observaron diferencias significativas a este nivel ($P < 0.05$).

Respecto a las interleucinas consideradas como antiinflamatorias, las IL-4 e IL-10, las expresiones de los genes respectivos (*il-4* e *il-10*) se muestran en la Figura 3 a y b, respectivamente. Se observaron expresiones positivas de *il-4* en los grupos de alimento Vegetal y en el grupo Control de El Zarco, así como expresión similar a la del gen de referencia en el Control de Los Manantiales. No se observaron interacciones significativas con respecto al origen y el tipo de alimento utilizados. La expresión positiva de *il-10* fue mayor en los organismos de El Zarco (tanto de los alimentados con la dieta Control, como con Vegetal) y cuando se compararon con los de Los Manantiales, pero no se observaron interacciones significativas. La expresión en el grupo de Los Manantiales fue similar al gen de referencia.

DISCUSIÓN

La disponibilidad limitada de harina de pescado a nivel mundial, ha llevado a la industria de la acuicultura a buscar alternativas para cubrir los requerimientos de proteína en los alimentos de especies carnívoras (Blaufuss *et al.*, 2020). Durante este estudio se utilizó un alimento con diferentes insumos de proteína vegetal en crías de trucha obtenidas de dos diferentes centros de producción acuícola en México.

Los valores de PF, GP y TCE de los organismos obtenidos de ambos orígenes y alimentados con la dieta comercial mostraron valores similares a los observados en otros trabajos (Cruz *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2015, Cid *et al.*, 2020). Sin embargo, el crecimiento se vió afectado

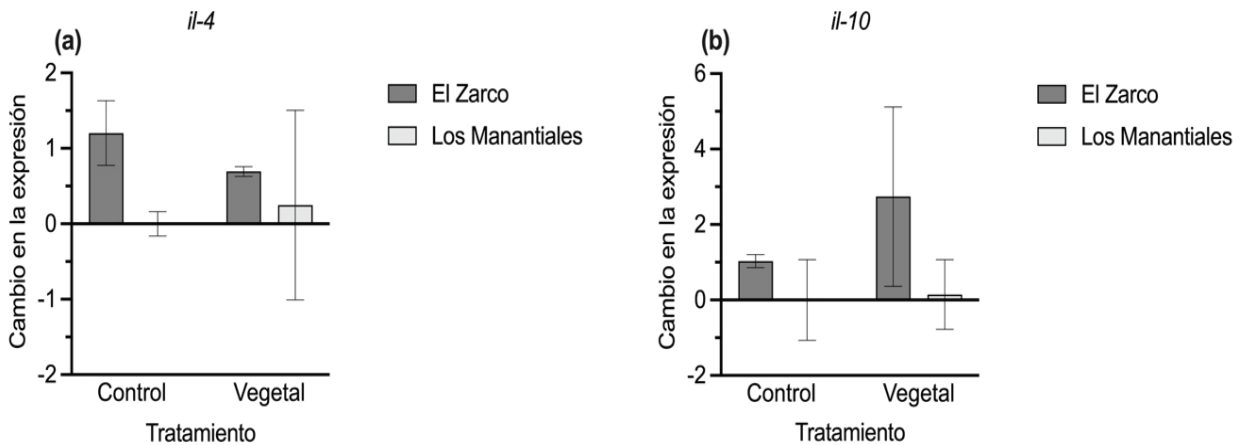


Figura 3a-b. Expresión de los genes *il-4* (a) e *il-10* (b) en la zona distal del intestino de crías de trucha arcoíris alimentadas con concentrados de proteína vegetal y provenientes de dos centros de producción en México. Cada columna representa el promedio de tres repeticiones ± error estándar. No se observaron diferencias significativas a este nivel ($P < 0.05$).

por el consumo del alimento con las proteínas vegetales, particularmente los organismos obtenidos de El Zarco. De acuerdo con Refstie *et al.* (1997), juveniles de trucha arcoíris requieren de un periodo de adaptación de aproximadamente 60 días cuando se utiliza proteínas de origen vegetal. Durante este trabajo, se utilizaron organismos de menos de 5 g peso inicial y es posible que en esta talla también requieran un periodo de adaptación, particularmente en los organismos de El Zarco. Esto puede confirmarse con los resultados obtenidos de la expresión de los genes relacionados con la respuesta inflamatoria. De acuerdo con Bakke-McKellep *et al.* (2007), Krogdahl *et al.* (2010) y Krogdahl (2015), el uso de productos de origen vegetal causa la inflamación de tejido epitelial del intestino y posiblemente enteritis en diferentes especies de salmonidos. Considerando esto, se evaluó la expresión de algunas interleucinas, que son un grupo de citocinas que juegan un papel importante en diferentes respuestas inmunológicas (Secombes *et al.*, 2011; Sakai *et al.*, 2021). La IL-1 β y la IL-8 actúan de forma complementaria en la respuesta inflamatoria al estimular las células T, incrementar la fagocitosis, la producción de anticuerpos e inducir la migración celular. El gen *il-1 β* usualmente regula positivamente al *il-8* y se observan patrones similares de expresión (Vélez-Calabria *et al.*, 2021). Los grupos de ambos orígenes y que recibieron el alimento basado en proteína vegetal mostraron expresión positiva de ambos genes, indicando un proceso inflamatorio en la parte distal del intestino al finalizar los 60 días de prueba. Como se mencionó anteriormente, la expresión positiva de *il-8* sigue a la de *il-1 β* y debido a ello, se considera que en el caso de los organismos provenientes de El Zarco el proceso inflamatorio esta disminuyendo, mientras que en el caso de los organismos de Los Mantaiales, va en aumento. Esto se confirma con los datos obtenidos con las interleucinas antiinflamatorias, ya que la expresión de *il-4* e *il-10* fue positiva en los organismos de El Zarco alimentados con el tratamiento Vegetal. La IL-4 tiene como funciones principales incrementar la producción de moco, reparación del tejido, así como la regulación positiva de *il-10* (Zhang *et al.*, 2023). Por otro lado, la IL-10 juega un papel predominante en el proceso antiinflamatorio, ya que puede suprimir diversas respuestas inmunes (Bottiglione *et al.*, 2020) y también se ha reportado que regula negativamente la expresión de *il-1 β* en el salmón del Atlántico y en la trucha arcoíris (Sequeira *et al.*, 2020).

Como se ha mencionado, la selección de organismos es una de las vías para un mayor aprovechamiento de las proteínas de origen vegetal (Overturf *et al.*, 2004). Diferentes autores (Callet *et al.*, 2021; Tsai *et al.*, 2022) reportan que algunos genotipos de trucha arcoíris tiene mayor capacidad de crecer y sobrevivir que otras, cuando se alimenta con las proteínas de origen vegetal. De acuerdo con los resultados obtenidos, la selección de los organismos obtenidos de el Centro de Producción Acuícola El Zarco puede ser una estrategia prometedora para mejorar el aprovechamiento de los productos de origen vegetal en alimentos balanceados para estos organismos. A pesar de que los organismos obtenidos de este centro mostraron una disminución significativa del crecimiento cuando recibieron el alimento con los concentrados de proteína, la expresión positiva de la *il-4* e *il-10* muestra una recuperación de un proceso inflamatorio, después de 60 días.

CONCLUSIONES

El alimento con los concentrados de proteína de arroz, chícharo y maíz, así como harina de soya tuvo un efecto negativo en el crecimiento de los organismos, sin importar el centro de producción acuícola del que

provinieron. Sin embargo, se observó la expresión positiva de *il-4* e *il-10* en aquellos provenientes de El Zarco sugiere la recuperación del proceso inflamatorio. Sin duda, se requieren realizar pruebas de alimentación con mayor duración, con organismos de otros centros de producción y determinar la expresión de estos genes de manera periódica, con la finalidad de establecer como afectan estas fuentes de proteína vegetal a la salud del intestino.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Fondo para la Investigación y Desarrollo Tecnológico del Estado de México del Consejo Mexicano de Ciencia y Tecnología, proyecto FICDTEM-2023-133. También se agradece la colaboración de Ingredion de México, S.A. de C.V. por proporcionarnos el gluten de maíz para la elaboración del alimento balanceado.

REFERENCIAS

- ABERNATHY J., A. BREZAS, K.R. SNEKVIK, R.W. HARDY & K. OVERTURF. 2017. Integrative functional analysis using rainbow trout selected for tolerances to plant diets reveal nutrigenomic signatures for soy utilization without the concurrence of enteritis. *PLOS ONE* 12: e0180972. DOI: 10.1371/journal.pone.0180972
- BAKKE-MCKELLEP, A.M., M.K. FRØYSTAD, E. LILLEENG, F. DAPRA, S. REFSTIE, Å KROGDAHL, & T. LANDSVERK. 2007. Response to soy: T-cell-like reactivity in the intestine of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Disease* 30: 13–25. DOI: 10.1111/j.1365-2761.2007.00769.x
- BLAUFUSS, P.C., J.W. BLEDSOE, G. GAYLORD, W.M. SEALEY, K.E. OVERTURF & M.S. POWELL. 2020. Selection on a plant-based diet reveals changes in oral tolerance, microbiota and growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) when fed a high soy diet. *Aquaculture* 525: 735287. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.735287
- BOTTIGLIONE, F., C.T. DEE, R. LEA, L.A.H. ZEEF, A.P. BADROCK, M. WANE, L. BUGEON, M.J. DALLMA, J.E. ALLEN & F.L. HURLSTONE. 2020. Zebrafish IL-4-like cytokines and IL-10 suppress inflammation but only IL-10 is essential for gill homeostasis. *Journal of Immunology* 205: 994-1008. DOI: 10.4049/jimmunol.200372
- BURRELLS, C., P.D. WILLIAMS, P.J. SOUTHGATE & V.O. CRAMPTON. 1999. Immunological, physiological and pathological responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to increasing dietary concentrations of soybean proteins. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 72: 277-288. DOI: 10.1016/S0165-2427(99)00143-9
- CALLET, T., M. DUPONT-NIVET, M. DANION, C. BUREL, M. CLUZEAUD, A. SURGET, P. AGUIRRE, T. KERNEIS, L. LABBÉ, S. PANSERAT, E. QUILLET, I. GEURDEN, S. SKIBA-CASSY & F. MÉDALE. 2021. Why do some rainbow trout genotypes grow better with a complete plant-based diet? Transcriptomic and physiological analyses on three isogenic lines. *Frontiers in Physiology* 12: 732321. DOI: 10.3389/fphys.2021.732321
- CONAPESCA. 2022. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2022. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, Mazatlán, Sinaloa. 280 p.
- CID G.R.A., L.H. HERNÁNDEZ., J.A. CARRILLO & M.A. FERNÁNDEZ. 2020. Inclusion of yeast and/or fructooligosaccharides in diets with plant-origin protein concentrates for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)

- fingerlings. *Journal of the World Aquaculture Society* 51: 970-981. DOI: 10.1111/jwas.12661
- CRUZ C.C.A., L.H. HERNÁNDEZ, M.A. FERNÁNDEZ, T. RAMÍREZ & O. ANGELES. 2011. Effects of diets with soybean meal on the growth, digestibility, phosphorus and nitrogen excretion of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Hidrobiológica* 21: 118-125.
- GATLIN, M.D., F.T. BARROWS, P. BROWN, K. DABROWSKI, T.G. GAYLORD, R.W. HARDY, E. HERMAN, G. HU, Å. KROGDAHL, R. NELSON, K. OVERTURF, M. RUST, W. SEALEY, D. SKONBERG, E.J. SOUZA, D. STONE, R. WILSON & E. WURTELE. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquaculture Research* 38: 551-579. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2007.01074.x
- KROGDAHL, Å., M. PENN, J. THORSEN, S. REFSTIE & A.M. BAKKE. 2010. Important antinutrients in plant feedstuffs for aquaculture: an update on recent finding regarding responses in salmonids. *Aquaculture Research* 41: 333-344. DOI: 10.1111/j.1365-2019.2009.0242.26x
- KROGDAHL, Å., K. GAJARDO, T.M. KORTNER, M. PENN, M. GU, G.M. BERGE, A.M. BAKKE. 2015. Soya saponins induce enteritis in Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63: 3887-3902. DOI: 10.1021/jf506242t
- HARDY, R.W. 1996. Alternate protein sources for salmon and trout diets. *Animal Feed Science and Technology* 59: 71-80. DOI: 10.1016/0377-8401(95)00888-8
- HARDY, R.W. 2010. Utilization of plant protein in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal. *Aquaculture Research* 41: 770-776. DOI: 10.1111/j.1365-2019.2009.02349.x
- HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, L.H. & J.A. CARRILLO-LONGORIA. 2018. Cultivo de trucha arcoíris en México: retos que enfrenta la producción sustentable. *Ciencia Pesquera* 26: 59-64.
- LAZZAROTTO V., G. CORRÁZE, A. LEPREVOSE, E. QUILLET, M. DUPONT-NIVET & F. MÉDALE. 2015. Three-year breeding cycle of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a plant-based diet, totally free of marine resources: consequences for reproduction, fatty acid composition and progeny survival. *PLOS ONE* 10: 1-17. DOI: 10.1371/journal.pone.0117609
- LIVAK, K.J. & T.D. SCHMITTGEN. 2001. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. *Methods* 25: 402-408. DOI: 10.1006/meth.2001.1262
- NRC. 2011. Nutrient requirements of fish and shrimp. The National Academies Press, Washington, D.C. 376 pp.
- OVERTURF K., D. BULLOCK, S. LA PATRA & R. HARDY. 2004. Genetic selection and molecular analysis of domesticated rainbow trout for enhanced growth on alternative diet sources. *Environmental Biology of Fishes* 69: 409-418. DOI: 10.1023/B:EBFI.0000022871.28836.5d
- Refstie, S., S.J. Helland & T. Storebakken. 1997. Adaptation to soybean meal in diets for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 153: 263-272. DOI: 10.1016/s0044-8486(97)00025-2
- SAKAI, M., J. HIKIMA & T. KONO. 2021. Fish cytokines: current research and applications. *Fisheries Science* 87: 1-9. DOI: 10.1007/s12562-020-01-01476-4
- SÁNCHEZ A.D., E. ARVIZU, L.H. HERNÁNDEZ, M.A. FERNÁNDEZ & O. ANGELES. 2015. Addition of yeast and/or phytase to diets with soybean meal as main protein source: effects of growth, P excretion and lysozyme activity in juveniles rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 15: 215-222. DOI: 10.4194/1303-2712-v15_2_03
- SECOMBES C.J., T. WANG, & S. BIRD. 2011. The interleukins of fish. *Developmental and Comparative Immunology*. 35: 1336-1345. DOI: 10.1016/j.dci.2011.05.001
- SEGURA-CAMPOS, J.M., A.A. TRUJANO-RODRÍGUEZ, L.H. HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, B. MACEDO-GARZÓN & R. CARDENAS-REYGDAS. 2021. Inclusion of fructooligosaccharides and mannanoligosaccharides in plant-protein based diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fingerlings and its effects on the growth and blood serum biochemistry. *Hidrobiológica* 31: 153-159. DOI: 10.24275/uam/izt/dcb7hidro72021v31n27Segura
- SEQUEIDA, A., A. CATILLO, N. CORDERO, V. WONG, R. MONTERO, C. VERGARA, B. VELENZUELA, D. VARGAS, N. VALDÉS, J. MORALES, M. TELLO, A.M. SANDINO, K. MAISEY & M. IMARAI. 2020. The Atlantic salmon interleukin 4/13 receptor family: structure, tissue distribution and modulation of gene expression. *Fish and Shellfish Immunology* 98: 773-787. DOI: 10.1016/j.fsi.2019.11.030
- TSAI, T.Y., L.H. HERNÁNDEZ, K.E. OVERTURF & M.S. POWELL. 2022. Comparative analysis of soybean effects in commercial strains of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. In: Cruz S.L.E., M. Tapia, M. G. Nieto, D. A. Villarreal, J. Gamboa & C. A. Martínez (Eds.). *Investigación e Innovación en Nutrición Acuicola*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México, pp.137-155.
- VÉLEZ-CALABRIA, G., D. SÁNCHEZ, M. JOVER-CERDÁ, S. MARTÍNEZ & A. TOMÉS-VIDAL. 2021. Successful inclusion of high vegetal protein sources in feed for rainbow trout without decrement in intestinal health. *Animals* 11: 3577. DOI: 10.3390/ani11123577
- ZAR, J.H. 1999. Biostatistical analysis. 4th ed. PrenticeHall. New Jersey, USA. 663 p.
- ZHANG, J., M. YU, J. WANG, M. LONGSHAW, K. SONG, L. WANG, X. LI, C. ZHANG, AND K. LU. 2023. Methanotroph (*Methylococcus camsulatus*, Bath) bacteria meal alleviates soybean meal-induced enteritis in spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) by modulating immune responses and the intestinal flora. *Aquaculture* 575: 739795. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2023.7