



EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE HARINA DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.), CONTENIDO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DE EXTRUSIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE ALIMENTOS ACUÍCOLAS

EFFECT OF BEAN FLOUR CONCENTRATION (*Phaseolus vulgaris* L.), MOISTURE CONTENT AND EXTRUSION TEMPERATURE ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF AQUAFEEDS

J. Rodríguez-Miranda¹, B. Ramírez-Wong², M. A. Vivar-Vera¹, A. Solís-Soto³, C. A. Gómez-Aldapa⁴, J. Castro-Rosas⁴, H. Medrano-Roldan³ y E. Delgado-Licon^{5*}

¹ Instituto Tecnológico de Tuxtepec, Av. Bravo Ahuja s/n Col. 5 de Mayo. C.P. 68360, Tuxtepec, Oaxaca, México.

² Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas, Apto. Postal 1658, C.P. 83000. Hermosillo, Sonora México.

³ Instituto Tecnológico de Durango, Blvd. Felipe Pescador 1830 Ote., C.P. 34080, Durango, Durango, México.

⁴ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ICBI-UAEH, Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Mineral de la Reforma, 42184 Pachuca, Hidalgo, México.

⁵ New Mexico State University, Department of Family and Consumer Sciences, NMSU Gerald Thomas Hall Room 308 P.O. Box 30003 MSC 3470 Las Cruces, NM 88003 USA.

Recibido 20 de Agosto de 2013; Aceptado 22 de Abril de 2014

Resumen

Se evaluó el efecto de la concentración de harina de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), contenido de humedad y temperatura de extrusión sobre las propiedades funcionales de alimentos acuícolas. Se elaboraron dietas con sustitución de harina de pescado por harina de frijol (15, 30 y 45%) y un control. El incremento de la harina de frijol en las dietas tiene efecto ($p < 0.05$), sobre el índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) y velocidad de hundimiento (VH). El aumento de la humedad de alimentación, disminuye ($p < 0.05$), el IE, ISA, L* y b*, pero incrementa ($p < 0.05$), la DA, VH, IAA, y a*. El incremento de temperatura de extrusión disminuyó ($p < 0.05$), el IE, DA, ISA, VH, color y aumentó ($p < 0.05$), el IAA. El IE más alto ($p < 0.05$), se encontró en la concentración del 15% de harina de frijol, 18% de humedad y a 120 °C, comparados con las demás concentraciones. La menor VH se encuentra en concentraciones de frijol menores al 30% y humedades de 18%. Se recomienda elaborar alimentos balanceados acuícolas con 15% de harina de frijol extrudidos a 18% de humedad y a 120 °C.

Palabras clave: acuicultura, harina de frijol, propiedades funcionales, extrusión.

Abstract

The effect of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour content, moisture content and extrusion temperature on the functional properties of fish feed was evaluated. Diets with fish meal and different bean flour concentrations (15, 30 and 45%) and control diet were developed. The results show that the bean flour present in the diets has an effect ($p < 0.05$) on expansion index (EI), bulk density (BD), water absorption index (WAI), water solubility index (WSI) and sinking velocity (SV). Extrusion moisture decreased ($p < 0.05$), EI, WSI and the color parameters L* and b*, but increased ($p < 0.05$), BD, SV, WAI, and the color parameter a*. The results also showed that an increase on extrusion temperature decreased ($p < 0.05$), EI, BD, WSI, SV, color and increased ($p < 0.05$), WAI. The highest ($p < 0.05$) EI was found in the extruded diet containing 15% of bean flour, 18% extrusion moisture and extruded at 120 °C, compared to other diets. The lowest ($p < 0.05$) SV was determined in the extruded diets with less than 30% bean flour and an extrusion moisture of 18%. The optimum extrusion conditions were found with diets containing 15% of bean flour and extruded with 18% moisture at 120 °C.

Keywords: aquaculture, bean flour, functional properties, extrusion.

*Autor para la correspondencia. E-mail: edelgad@ad.nmsu.edu, edelgad_2000@yahoo.com
Tel. +52-618-8186936, Ex. 105. Fax +52-618-8186936

1 Introducción

Las semillas de varias especies de frijol y en particular las del género *Phaseolus* desde hace tiempo se sabe que son una fuente rica en proteínas, minerales (fosforo y hierro), vitaminas y energía en dietas para humanos y animales monogástricos (Azevedo y col., 2003; Winham y Hutchins, 2007; Anton y col., 2009). El reemplazo de la harina de pescado por harina de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en la elaboración de dietas para especies de salmónidos no ha sido reportada, a pesar, que esta leguminosa representa una buena fuente de proteínas, presentando una ventaja económica sobre la utilización de otras fuentes vegetales como la soya. Las dietas para trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), requieren contenidos proteínicos que varían entre 29 y 50% y bajos niveles de almidón 1-2% (Sevgili y col., 2006). Actualmente se han realizado investigaciones con la sustitución parcial de harina de pescado con algunas leguminosas. Cabanillas-Beltran y col. (2013) evaluaron la sustitución de harina de pescado de 10 y 18% con harina de frijolillo (*Rynchosia minima*) y frijol de palo (*Cajanus cajan*) respectivamente, en dietas para camarón blanco. Encontrando que después de un proceso térmico mejora la digestibilidad de estas harinas pudiendo reemplazar parcialmente la proteína de origen animal en dietas para camarón blanco en niveles del 10 y 18% respectivamente. Kader y col. (2012), evaluaron el efecto de la sustitución de harina de pescado por harina de soya descascarado de 0, 10, 20 y 30% en dietas para besugo (*Pagrus major*), concluyeron que la harina de soya descascarado podría reemplazar completamente la harina de pescado en las dietas para juveniles de besugo sin efectos adversos en el desempeño del pescado. Thiessen y col. (2003), evaluaron el efecto del proceso en autoclave o extrusión usando harina de canola sobre la digestibilidad del alimento para la trucha arco iris, encontrando que la digestibilidad del almidón aumento de 41-75% cuando la dieta fue extrudida. Es por ello que los extrudidos con alto contenido de proteína vegetal deben poseer la misma calidad, tanto nutricional, funcional, de palatabilidad y propiedades físicas, que los pellets obtenidos por extrusión a base de harina de pescado (FAO, 2000; Bandyobadhyay y Ranjan, 2001). Por lo anterior, la acuicultura requiere una serie de avances técnicos para el mejoramiento de los pellets, así como el uso del proceso de extrusión para mejorar la digestibilidad y el desarrollo de alimentos de alta energía. Entre las ventajas de la extrusión para la producción de alimentos para la

acuicultura están: el control de la densidad de los pellets, una mayor estabilidad en el agua, una mayor eficiencia de producción y la versatilidad que ofrece el proceso (Tapia-Picazo y col., 2014). Así mismo la desactivación de algunos factores anti-nutricionales presentes, como los inhibidores de tripsina en frijol, que se reducen de 80 a 90% por efecto térmico (Gujka y Khan, 1991; Alonso y col., 2000; Purushotham y col., 2007). También se relaciona con las propiedades funcionales específicas del producto. La gelatinización del almidón durante la extrusión está también influenciada por las proteínas y los lípidos presentes en la mezcla (Ilo y col., 2000; Ditudompo y col., 2013). La cantidad de almidón presente en los extrudidos juega un papel importante en el alimento para peces. Su cantidad está en función del diseño de la dieta, obteniéndose un alimento que flote (alta expansión) o se hunda (baja expansión). Un mínimo de 9 a 11% de almidón es necesario para hacer un alimento hundible y un 18 a un 22% para un alimento flotante. La cantidad de almidón requerido para lograr la expansión deseada, es también influenciado por la disponibilidad del agua o por la extensibilidad de ciertas proteínas contenidas en la fórmula. La presencia de estas proteínas funcionales incrementa la expansión, las características de cohesión y pueden permitir disminuir significativamente el nivel de almidón requerido (Rokey y Plattner, 2003; Madeka y Kokini, 1992). La expansión del almidón depende principalmente del grado de gelatinización del mismo durante el proceso de extrusión, el cual puede ser gelatinizado hasta un 90%, promoviendo la interrelación molecular de los ingredientes de la formulación (Kokini y col., 1992; Rodríguez-Miranda y col., 2011; Seth y Rajamanickam, 2012; Umar y col., 2013). El procesamiento, composición de la dieta y contenido de humedad, influyen usualmente en el índice de expansión, ya que dictan el tipo y el grado de modificaciones físicas y químicas que tienen lugar durante la extrusión (Arhaliass y col., 2009; Oke y col., 2013; Bisharat y col., 2013). La densidad aparente de las dietas extrudidas está directamente relacionada con el grado de expansión que se obtiene durante la extrusión, lo cual, también afecta a la flotabilidad y la velocidad de hundimiento de los extrudidos (Chevanana y col., 2007; Bandyobadhyay y Ranjan 2001; Rolfe y col., 2001). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la concentración de harina de frijol, humedad de alimentación y la temperatura de extrusión sobre las propiedades funcionales de alimentos acuícolas.

2 Materiales y métodos

2.1 Preparación de las dietas experimentales

Se elaboraron dietas con sustitución parcial de harina de pescado de 15, 30 y 45% por harina de frijol, y una dieta control sin sustitución (DC) (Tabla 1), sustitución con 15% de harina de frijol (BF15), sustitución con 30% de harina de frijol (BF30) y sustitución con 45% de harina de frijol (BF45). Se utilizó frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de la variedad Pinto Saltillo, cosecha Primavera-Verano de 2011, producida en el Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria (INIFAP) Durango, México y harina de pescado (California Plant's Choice, Ensenada Baja California, México). Los granos de frijol se molieron (Buhler, S.P.A Segrate (MI) VIA Rivolta 2/D, Bacilea, Suiza) y tamizaron (No. 32) (estándar test sieve Astm E-11 Specification W.s. Tyler, Made in USA) a 0.5 mm.

2.2 Proceso de extrusión

Para elaborar las dietas se utilizó un extrusor de tornillo simple Brabender (Modelo E 19/25 D, Instruments Inc South Hackensack, NJ USA), de laboratorio con las siguientes características: cuatro zonas de calentamiento, fuerza de compresión del tornillo 1:1 (Figura 1), relación longitud/diámetro (L/D) 20:1, diámetro interno del dado de salida circular de 3 mm. Antes de extrudir se realizó el mezclado de las formulaciones así como el ajuste el contenido de humedad de 18 y 22% y se extruyeron a 120 y 150 °C (Zona 4), manteniendo constantes las demás zonas de calentamiento (Zona 1: 50 °C, Zona 2: 80 °C y Zona 3: 100 °C). A una velocidad de tornillo constante de 100 RPM y una velocidad de alimentación de 30 g/min. Los extrudidos se secaron a 45 °C por 20 h, se almacenaron en bolsas de polietileno selladas y se almacenaron a temperatura ambiente (25 °C) para su análisis posterior.

Tabla 1. Formulación de dietas a base de diferentes concentraciones de harina frijol y harina de pescado para alimentación en la acuicultura

Ingredientes (%)	Dietas			
	CD	HF15	HF30	HF45
Harina de pescado ¹	62	52.7	43.4	34.1
Harina de frijol	-	93	186	279
Harina de trigo	20	20	20	20
Aceite de pescado ²	12	12	12	12
Suero de leche ³	3.4	3.4	3.4	3.4
Cloruro de colina ⁴	0.5	0.5	0.5	0.5
Premezcla de vitaminas y Minerales ⁵	2.1	2.1	2.1	2.1
Total (%)	100	100	100	100

¹California Plant's Choice, Ensenada Baja California, México.

²Proteínas de Calidad, México D.F., México. ³F& A Dairy products, Inc. Las Cruces NM 88007 Product of The U.S.A.

⁴Choline chloride Sigma-Aldrich, Co., 3050 spruce street, St. Louis, MO 63103 USA. Reagent Grade \geq 98%, ⁵Composition of the vitamin and mineral premix: Ca,196 g/kg; P,46 g/kg; Na, 57 g/kg; NaCl, 111 g/kg; Mg,12 g/kg; Fe,2.4 g/kg; Cu, 14 mg/kg; Mn, 1698 mg/kg; Se, 150 mg/kg; vitamin A, 4000,000,000 UI; vitamin D3,40,000,000 UI; vitamin E, 400,000 UI, vitamin K, 160g/kg; vitamin B1, 61g/kg; vitamin B2, 160 g/kg; vitamin B6, 84g/kg; vitamin B12, 0.4 g/kg, folic acid, 4g/kg; calcium pantothenate, 540 g/kg.

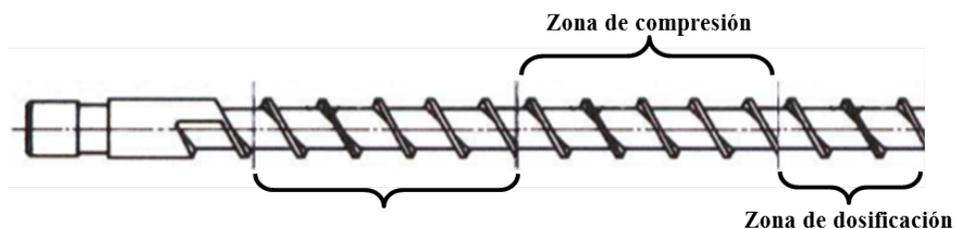


Fig. 1. Esquema del tornillo de compresión (1:1) empleado en el proceso de extrusión.

2.3 *Análisis proximal*

El análisis químico proximal (AQP) se realizó de acuerdo a los métodos descritos por la A.O.A.C. (2005): contenido de humedad por desecación (A.O.A.C. 925.45), cenizas por el método de incineración en seco (A.O.A.C 938.08), grasa cruda por extracción con éter de petróleo (A.O.A.C. 989.05), proteína cruda por el método Kjeldahl usando el factor $N \times 6.25$ (A.O.A.C. 991.20) y el extracto libre de nitrógeno se determinó a partir de la diferencia de 100 % menos el porcentaje de contenido de proteína, ceniza y grasa en base seca (b.s).

2.4 *Parámetros de evaluación*

2.4.1 *Índice de expansión (EI) y densidad aparente (DA)*

El IE se mide de acuerdo al método de Gujska y Khan (1990), dividiendo el diámetro del extrudido entre el diámetro del orificio del dado de salida del extrusor. La DA fue determinada de acuerdo a la técnica reportada por Wang y col. (1993). A diez muestras de extrudidos seleccionados al azar, se les midió el diámetro (d) y longitud (l). A cada muestra se le tomaron tres mediciones del diámetro y se calculó el valor promedio. Posteriormente se pesó cada extrudido (Pm), para finalmente determinar la densidad utilizando la ecuación 1: Los resultados se expresaron en g/cm^3 .

$$\text{Densidad} = \frac{Pm}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 l} \quad (1)$$

2.4.2 *Índice de absorción de agua (IAA) y el Índice de Solubilidad en agua (ISA)*

El IAA y el ISA se determinaron acuerdo al método de Anderson y col. (1969). Un gramo de producto molido fue tamizado en una malla No 40 (0.420

mm, estándar test sieve Astm E-11 Specification W.s. Tyler, Made in USA) y se dispersó en 10 ml de agua destilada a temperatura ambiente (25 ± 1 °C). La suspensión resultante se agitó suavemente durante 30 min y se centrifugó a $1006 \times g$ por 15 min (Hettich Zentrifugen EBA 12 D-78532, Germany). El sobrenadante se decantó en una cápsula previamente tarada. Los resultados se expresaron como gramos de agua retenida por gramo de muestra para IAA y el ISA en porcentaje.

2.4.3 *Velocidad de hundimiento (VH)*

La VH se midió siguiendo el método reportado por Himadri y col. (1993). La velocidad de hundimiento se midió registrando el tiempo que tarda un extrudido en hundirse de la superficie del agua a una profundidad de 425 mm en una probeta de 2000 mL.

2.4.4 *Color*

El color se determinó mediante un colorímetro triestímulo Hunter lab (MiniScan Hunter Lab, modelo 45/0L, Hunter Associates Lab., Ind., Reston, Virginia U.S.A). Se obtuvieron los valores L^* (Claridad), a^* (cromaticidad rojo-verde) y b^* (cromaticidad amarillo-azul).

2.4.5 *Análisis estadístico*

Los resultados se expresaron considerando el promedio de tres o cuatro determinaciones. El análisis estadístico (ANDEVA) se realizó con un diseño completamente al azar y por lo menos una diferencia significativa (LSD) para determinar las diferencias significativas entre tratamientos. Se empleó el Sistema de Análisis Estadístico (SAS). La diferencia estadística entre las medias se determinó en un nivel confiabilidad del 95%.

3 Resultados

3.1 Composición química de las dietas

Los resultados del análisis químico de las dietas extrudidas se presentan en la Tabla 2. El porcentaje de sustitución de harina de frijol no afectó de manera significativa ($p > 0.05$) el contenido de proteína, en comparación con la DC. El contenido de grasa aumentó ($p < 0.05$) en los extrudidos con 15% de harina de frijol, comparado con la DC. En cuanto al contenido de cenizas y la fracción libre de nitrógeno se encontró efecto significativo ($p > 0.05$) en los extrudidos, comparados con la DC a acepción de HF15.

3.2 Índice de expansión (IE)

En la Tabla 3, se observa que la concentración de harina de frijol tiene un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el IE. Este último disminuye ($p < 0.05$), al incrementar la concentración de harina de frijol a las dos temperaturas (120 y 150 °C), en los dos contenidos de humedad empleados (18 y 22%), disminuyendo de 1.14 en promedio a 1.06. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$), en las concentraciones del 30 y 45% a 18 y 22% de humedad y 120 °C, al igual que a 22% de humedad a 150°C. Tampoco se encontraron diferencias ($p > 0.05$), entre las dietas DC y BF15. Al incrementar el contenido de humedad, el IE disminuyó significativamente ($p < 0.05$), en todos los tratamientos de harina de frijol a 120 °C, y en la DC disminuyó al usar la temperatura de 150 °C.

3.3 Densidad aparente (DA)

La concentración de harina de frijol tiene un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la densidad aparente (DA) de los extrudidos (Tabla 3). La DA aumentó ($p < 0.05$) al aumentar el contenido de harina de frijol en el extrudido en las dietas con 30 y 45% de frijol, en comparación con la dieta control a 18% de humedad y 120 °C. La DA aumentó de igual manera en la dieta con 45% de frijol a 18% de humedad y en las dietas con 15 y 30 de frijol a 22% de humedad y 150 °C, con respecto al control. A temperaturas de extrusión de 120 °C, aumentó ($p < 0.05$) la DA en la DC, BF15 y BF30 al aumentar la humedad de extrusión. Este efecto no se presentó a 150 °C, incluso la DA disminuyó ($p < 0.05$) en la dieta BF45.

3.4 Índice de absorción de agua (IAA)

El IAA, disminuyó ($p < 0.05$), en las dietas con harina de frijol, en comparación con la DC sin harina de frijol (Tabla 3). El IAA aumento ($p < 0.05$), en la DC al aumentar la humedad de extrusión de 18 a 22% a 120 °C, y al aumentar la temperatura de extrusión a 150 °C.

3.5 Índice de solubilidad en agua (ISA)

El ISA en los extrudidos para alimento de pescado, vario entre 7.85 y 12.45 (Tabla 3). La temperatura, contenido de humedad y concentración de harina de frijol, presentaron efecto significativo ($p < 0.05$), sobre el ISA (Tabla 3). La concentración de harina de frijol, no presentó efecto significativo ($p > 0.05$) en las dietas, BF30 y BF45 extrudidas a 120 °C y 18% de humedad, al igual que en la BF30 extrudidas a la misma temperatura, pero con 22% de humedad, en relación al control (DC).

Tabla 2. Composición química de extrudidos a base de diferentes concentraciones de harina de frijol y harina de pescado para alimentación en la acuicultura

Dietas	Componente (g/ 100g)				
	Materia seca	Proteína cruda ($N \times 6.25$)	Grasa cruda	Ceniza	Extracto libre de nitrógeno
CD	91.7 ± 0.23 ^a	48.7 ± 2.00 ^a	16.9 ± 1.03 ^a	12.9 ± 0.15 ^c	29.2 ± 0.95 ^a
HF15	91.6 ± 0.17 ^a	41.9 ± 1.10 ^b	18.8 ± 0.15 ^b	11.4 ± 0.10 ^b	27.8 ± 1.00 ^a
HF30	91.9 ± 0.00 ^a	40.9 ± 1.02 ^b	16.7 ± 0.19 ^a	10.4 ± 0.46 ^a	24.1 ± 0.99 ^b
HF45	92.5 ± 0.13 ^b	38.7 ± 1.17 ^c	16.4 ± 0.01 ^a	9.7 ± 0.31 ^a	35.0 ± 0.91 ^c

^{a-c} Valores con letras diferentes en un misma columna, representan diferencias significativas ($p < 0.05$), DC = dieta control; HF15=muestra con 15% de harina de frijol; HF30=muestra con 30% de harina de frijol; HF45=muestra con 45% de harina de frijol.

Tabla 3. Efecto del contenido de humedad y temperatura de extrusión sobre el índice de expansión, densidad aparente e índice de absorción y solubilidad de agua de extrudidos para alimentación de peces con diferente concentración de harina de frijol

Muestra	Concentración de harina de frijol (%)	Temperatura de extrusion (°C)			
		120		150	
		Humedad de extrusion (%)			
		18	22	18	22
Índice de expansion (IE)					
DC	0	1.13±0.04 ^g	1.03±0.05 ^{abcd}	1.08±0.05 ^f	1.08±0.03 ^{ef}
HF15	15	1.15±0.05 ^g	1.03±0.05 ^{bcd}	1.01±0.04 ^{abc}	0.98±0.03 ^a
HF30	30	1.06±0.03 ^{def}	0.99±0.03 ^{ab}	1.04±0.03 ^{cdef}	1.01±0.03 ^{abc}
HF45	45	1.07±0.02 ^{def}	0.99±0.02 ^{ab}	1.00±0.11 ^{abc}	1.03±0.02 ^{bcd}
Densidad aparente (DA) (g/cm ³)					
DC	0	0.87±0.07 ^{ab}	1.12±0.05 ^{gh}	0.96±0.05 ^{bcd}	0.88±0.03 ^{abc}
HF15	15	0.84±0.06 ^a	1.00±0.12 ^{def}	0.94±0.05 ^{abcd}	1.00±0.07 ^{def}
HF30	30	1.00±0.07 ^{def}	1.15±0.07 ^h	0.98±0.08 ^{cd}	1.02±0.08 ^{def}
HF45	45	0.99±0.06 ^{de}	1.09±0.06 ^{efgh}	1.10±0.33 ^{fgh}	0.93±0.05 ^{abcd}
Índice de absorción de agua (IAA) (g H ₂ O/g)					
DC	0	2.37±0.05 ^{de}	2.58±0.23 ^f	2.63±0.04 ^f	2.48±0.23 ^{ef}
HF15	15	1.99±0.04 ^{ab}	2.15±0.01 ^{bc}	2.06±0.02 ^{ab}	1.98±0.05 ^a
HF30	30	2.23±0.09 ^{cd}	2.31±0.05 ^d	2.36±0.01 ^{de}	2.33±0.01 ^{de}
HF45	45	2.00±0.00 ^{ab}	2.12±0.03 ^{abc}	1.96±0.04 ^a	2.00±0.01 ^{ab}
Índice de solubilidad de agua (ISA) (%)					
DC	0	10.16±0.05 ^{def}	8.25±0.13 ^{ab}	8.71±0.04 ^{abc}	10.53±0.56 ^{fg}
HF15	15	11.45±0.41 ^{gh}	9.90±0.05 ^{def}	10.20±0.23 ^{def}	9.24±0.26 ^{bcd}
HF30	30	10.36±0.05 ^{ef}	8.61±0.05 ^{adc}	9.37±0.16 ^{cde}	8.47±0.07 ^{abc}
HF45	45	10.01±0.54 ^{edf}	12.45±1.78 ^h	10.80±0.07 ^{fg}	7.85±0.02 ^a

^{a-h} Valores con la misma letra en una misma propiedad de una muestra no son diferentes significativamente ($p < 0.05$); DC = dieta control; HF15=muestra con 15% de harina de frijol; HF30=muestra con 30% de harina de frijol; HF45=muestra con 45% de harina de frijol.

3.6 Velocidad de hundimiento (VH)

En la Tabla 4, se presentan los resultados de la VH de los extrudidos. La temperatura y humedad de extrusión, mostraron un efecto significativo ($p < 0.05$), sobre la VH. Con respecto a la concentración, de manera general, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), sin embargo entre las dietas DC y BF15 no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) cuando estas se extruyeron a 120 °C y 18% de humedad, el mismo efecto fue observado también en estas mismas dietas extrudidas a 150 °C y 22% de humedad.

3.7 El color

Los resultados del color se muestran en la Tabla 4. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en todas las dietas en los valores de L* [luminosidad, de 0 (oscuro) a 100 (claro)], el cual aumenta al incrementarse la concentración de harina de frijol de 42.55 a 51.05 en las dietas elaboradas a 120 °C y 18% de humedad, mostrando la misma tendencia en ambas humedades (18 y 22%) y temperaturas (120 y 150 °C) empleadas. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las humedades y temperaturas usadas, encontrando una reducción de L* al aumentar la humedad y al aumentar la temperatura.

Tabla 4. Efecto del contenido de humedad y temperatura de extrusión sobre la velocidad de hundimiento y color para alimentación de peces con diferente concentración de harina de frijol

Muestra	Concentración de harina de frijol (%)	Temperatura de extrusión (°C)			
		120		150	
		Humedad de extrusión (%)			
		18	22	18	22
Velocidad de hundimiento (cm/s)					
DC	0	2.71±0.24 ^a	4.60±0.40 ^{de}	4.33±0.39 ^a	2.60±0.37 ^{cd}
HF15	15	2.75±0.39 ^a	5.66±0.96 ^{gh}	2.84±0.20 ^a	3.22±0.56 ^{ab}
HF30	30	5.15±0.43 ^{ef}	6.21±1.00 ^h	3.16±0.62 ^a	4.22±0.59 ^{cd}
HF45	45	5.49±0.74 ^{fg}	6.01±0.79 ^{gh}	3.82±0.76 ^{bc}	4.37±0.97 ^{cd}
Color					
L*					
DC	0	42.55±0.13 ^e	42.15±0.06 ^c	42.35±0.06 ^d	41.18±0.05 ^a
HF15	15	45.50±0.08 ^f	45.70±0.08 ^g	46.48±0.10 ^h	41.53±0.10 ^b
HF30	30	47.85±0.10 ⁱ	49.15±0.10 ^j	47.75±0.06 ⁱ	46.55±0.06 ^h
HF45	45	52.70±0.08 ^k	52.43±0.03 ^l	51.05±0.10 ⁿ	51.90±0.12 ^m
a*					
DC	0	4.50±0.08 ^e	4.73±0.05 ^c	4.65±0.06 ^d	4.73±0.05 ^a
HF15	15	4.70±0.00 ^f	4.63±0.05 ^g	4.43±0.05 ^h	5.10±0.00 ^b
HF30	30	4.28±0.05 ⁱ	4.20±0.00 ^j	4.13±0.05 ⁱ	4.15±0.06 ^h
HF45	45	3.85±0.17 ^h	4.15±0.06 ^m	3.95±0.06 ^k	3.93±0.05 ^l
b*					
DC	0	13.68±0.05 ^a	13.58±0.17 ^a	13.60±0.12 ^a	13.53±0.05 ^a
HF15	15	14.98±0.10 ^f	14.30±0.08 ^{cde}	14.25±0.13 ^{cd}	14.38±0.10 ^{de}
HF30	30	14.45±0.13 ^e	14.38±0.10 ^{de}	14.18±0.10 ^c	13.95±0.25 ^b
HF45	45	16.70±0.08 ⁱ	16.50±0.00 ^h	16.00±0.08 ^g	16.10±0.00 ^g

^{a-h} Valores con la misma letra en una misma propiedad de una muestra no son diferentes significativamente ($p < 0.05$); DC = dieta control; HF15=muestra con 15% de harina de frijol; HF30=muestra con 30% de harina de frijol; HF45=muestra con 45% de harina de frijol.

Mientras que para a* [de -60 (verde) a + 60 (rojo)], se encontró una tendencia inversa a la presentada por los valores de L*, ya que al incrementarse la concentración de harina de frijol, se incrementa el tono de verde (de 13.68 a 16.70, respectivamente), encontrándose la misma tendencia en las dos humedades (18 y 22 %) y temperaturas (120 y 150 °C) empleadas. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las humedades y temperaturas usadas, observándose un incremento de a* al aumentar la humedad y la temperatura. Los valores de b*[de -60 (azul) a + 60 (amarillo)] presentaron la tendencia de aumentar la tonalidad azul (b*) al incrementarse la concentración de haría de frijol, encontrándose un efecto significativo ($p < 0.05$) en todos los casos.

4 Discusión

4.1 Composición química de las dietas

Los resultados del contenido de proteínas se encuentra dentro de lo reportado en la literatura (26-50%) para dietas de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) (Lovell, 1989). Las diferencias encontradas se deben a que al aumentar el contenido de harina de frijol se disminuye la concentración de harina de pescado que es la materia prima en la dieta que mayor contenido de proteínas aporta a la formulación. El contenido encontrado en BF45 se encuentra dentro del intervalo de contenido de proteínas de dietas existentes en el mercado (28-42%). El contenido de proteínas encontrado en esta investigación se encuentra por encima de lo reportado por Fallahi y

col., (2013) en alimentos acuícolas usando granos secos de destilería con solubles (38.25%) y Ayadi y col., (2011a) en dietas para Perca amarilla (*Perca flavescens*) usando granos secos de destilería con solubles (DDGS) (28.5 a 30.4%) y dentro del intervalo reportado por Mjoun y Rosentrater (2011) en dietas acuícolas a base de granos secos de destilería con solubles (27.9%), harina de soya (51%) y de harina de pescado (64.2%) y por debajo a lo reportado por Kader y col. (2012), en dietas para besugo (*Pagrus major*) con sustitución de harina de pescado por harina de soya descascarado (48.8 a 50.4%), An-Hen y col., (2014) en alimentos extrudidos para el salmón del Atlántico elaboradas con la sustitución parcial o total de harina de trigo con harina de avena y almidón de tapioca (58.4 a 60.6%). La proteína de soya se considera como el componente vegetal más nutritivo y se usa ampliamente en la alimentación animal y la acuicultura. Sin embargo, la proteína de frijol, por su composición de aminoácidos, también representa una alternativa para la alimentación acuícola. La proteína vegetal también tiene ventajas en comparación a la harina de pescado, debido a que no posee aminos biogénicos (Swick y col., 1995). En este trabajo se obtuvieron extrudidos de hasta 45% de sustitución de harina de frijol por harina de pescado; en la literatura se ha demostrado que se puede sustituir hasta de un 50% de proteína de soya, sin afectar el crecimiento de trucha arco iris (Stickney y col., 1996; Médale y col., 1998; Mambrini y col., 1999).

4.2 Índice de expansión (IE)

Gujska y Khan (1991), encontraron que el IE disminuyó al incremento del contenido de humedad extruyendo a 120 oC. En esta investigación, todas las dietas con concentraciones mayores de 30% de harina de frijol (Tablas 2 y 3), mostraron una disminución ($p < 0.05$), del IE, al aumentar la el contenido de humedad. Por otra parte, Owusu-Ansah y col. (1984), encontraron que aquellos extrudidos con un alto contenido de almidón requieren mayor cantidad de humedad para obtener altos IE, ya que los cambios en las propiedades funcionales como el IE y la densidad aparente (DA), en los productos extrudidos se atribuyen en gran parte a la gelatinización del almidón (Zazueta-Morales y col., 2002; Pérez-Navarrete y col., 2006; Rodríguez-Miranda y col., 2011; Bisharat y col., 2013), sin embargo la presencia de otros componentes tales como las proteínas y las variables de proceso como, la fuerza de cizalla durante la extrusión y la acción

simultánea de la temperatura también pueden afectar las propiedades funcionales de los extrudidos. A medida que aumenta el contenido de proteínas, la acción de la fuerza de corte dentro del barril puede interrumpir las interacciones con los componentes y limitar la extensibilidad de la masa durante la expansión en la salida del dado, disminuyendo el IE (Madeka y Kokini 1992; Rodríguez-Miranda y col., 2011). Es sabido que el uso de aceites (mayor de 6%), en productos extrudidos presenta un efecto negativo sobre la gelatinización del almidón y por ende el IE, en los procesos de extrusión (Park y col., 1993; Ilo y col., 2000). Esto se debe a una disminución de la temperatura de extrusión y a una reducción del daño mecánico de los gránulos de almidón causada por el efecto lubricante de la grasa, limitando la gelatinización. Los materiales con alto contenido en lípidos, por encima del 10% en extrusores de tornillo simple con características similares al empleado en esta investigación no son generalmente recomendados para extrudir (Ilo y col., 2000; Singh y col., 2006). Las dietas de estudio, en el presente trabajo tienen contenido de grasa mayores al 16% y altos contenidos de proteína (Tabla 2), Esto explica, en parte el por qué, IE no aumenta o incluso disminuye en algunas dietas, al aumentar la disponibilidad de agua en el proceso de extrusión. Los resultados encontrados se encuentran por encima de los reportado por Mjoun y Rosentrater, (2011) de 0.88 a 0.83 en dietas acuícolas elaboradas con DDGS y harina de soya, y por lo reportado por Ayadi y col., (2011b y 2013) de 0.55 a 1.05 en dietas para tilapia del Nilo a base de DDGS y harina de soya y dentro del intervalo a lo reportado por Kannadhasan y col., (2009a) de 1.04 a 1.16 en dietas acuícolas elaboradas con DDGS y almidón de tapioca, Rosentrater y col., (2009a) de 1.10 a 1.30 en dietas acuícolas elaboradas con DDGS y almidón de papa, Kannadhasan y col., (2009b) de 1.10 a 1.49 dietas acuícolas elaboradas con DDGS y tres tipos de almidón (tapioca, maíz y papa) y Rosentrater y col., (2009b) de 0.99 a 1.10 en dietas acuícolas elaboradas con DDGS y maíz de papa.

4.3 Densidad aparente (DA)

La DA y el IE están inversamente relacionadas entre sí, cuanto mayor sea la expansión, menor será la densidad. De igual manera, la DA de las dietas extrudidas está directamente relacionada con el IE y la flotabilidad (Sacchetti y col., 2005; Chevanana y col., 2007; Bisharat y col., 2013; Umar y col., 2013). En extrudidos a base de frijol, se ha encontrado IE

entre 1.8 y 3, mientras que la DA no sobrepasó 0.55 g/cm³ (Gujska y Khan, 1991a; Gujska y Khan, 1991b, Umar y col., 2013), indicando que a mayor contenido de proteína, menor IE y por ende mayor DA. El índice de expansión en todos los experimentos no sobre paso 1.15, mientras que la DA osciló entre 0.84 y 1.15 (Tabla 3). Los alimentos balanceados extrudidos para peces, contienen alta cantidad de grasa y proteína animal, ambos factores que disminuyen el IE y aumentan la DA (Park y col., 1993). Los resultados de la DA de esta investigación por encima de lo reportado por Umar y col., (2013) de 0.421 a 0.491 g/cm³ en dietas acuícolas combinando almidones de sago y tapioca, Ayadi y col., (2013) de 0.197 a 0.233 g/cm³, Fallahi y col., (2013) de 0.465 a 0.55 g/cm³, Ayadi y col., (2011b) de 0.199 a 0.233 g/cm³, Mjoun y Rosentrater, (2011) de 0.509 a 0.534 g/cm³, Rosentrater y col., (2009b) de 0.319 a 0.430 g/cm³, Rosentrater y col., (2009a) de 0.349 a 0.406 g/cm³ y Kannadhasan y col., (2009a) de 0.352 a 0.430 g/cm³ y por debajo de lo reportado por Ah-Hen y col., (2014) de 1.09 a 1.18 g/cm³.

4.4 Índice de absorción de agua (IAA)

El IAA no se vio afectado por las diferentes concentraciones de frijol. El IAA está relacionado primordialmente con la cantidad de agua absorbida por los gránulos de almidón durante el proceso de extrusión, pudiendo ser utilizado indirectamente con el grado de gelatinización del mismo (Van den Einde y col., 2003; Chevanan y col., 2007; Rodríguez-Miranda y col., 2011; Bisharat y col., 2013). El IAA también se relaciona con el balance hidrofílico de las proteínas presentes en la mezcla, el cual cambia en función del grado de desnaturalización de las mismas, donde por efecto del proceso de extrusión se cambian los perfiles de solubilidad de estas (Singh y col., 2007). El IAA en extrudidos a base de frijol, oscila generalmente entre 2.0 y 4.6 (Gujska y Khan, 1991a; Gujska y Khan, 1991b). Los resultados de IAA de este trabajo (Tabla 3), se encuentran en el límite inferior, inclusive las dietas con frijol BF15 (18% de humedad-120 °C; 22% humedad-150 °C) y la dieta BF45 (22% humedad-150 °C), están por debajo de los valores reportados por varios autores (Gujska y Khan, 1991a; Gujska y Khan, 1991b). Un IAA bajo, indica una disponibilidad de agua restringida para el gránulo de almidón, debido a una estructura más compacta (Kokini et al., 1992; Seth y Rajamanickam, 2012), este efecto se debe en las muestras, al alto contenido de grasa presente (Tabla 2 y 3). Anderson (1969a, 1969b,

1982) y Gujska y Khan (1990), encontraron que el IAA aumenta al aumentar la humedad y temperatura de extrusión. A diferencia de estos autores, nuestros resultados muestran el aumento del IAA en relación a temperatura y humedad, solo en la dieta control, sin harina de frijol. La humedad y temperatura de extrusión, no mostraron efecto significativo ($p > 0.05$), en las dietas a base de harina de frijol y altas concentraciones de grasa (Tabla 2 y 3), debido a que los aceites limitan la gelatinización y por ende el IAA, y a temperaturas bajas de extrusión y a una reducción del daño mecánico de los gránulos de almidón causada por el efecto lubricante de la grasa (Ilo y col., 2000; Singh y col., 2006; Ditudompo y col., 2013). El IAA de esta investigación se encuentran por encima de lo reportado por Glencross y col., (2010) de 1.3 a 1.6 g H₂O/g en dietas elaboradas con diferentes concentraciones de lupino y por debajo de lo reportado por: Rosentrater y col., (2009a y 2009b) de 2.75 a 4.45 g H₂O/g, Ayadi y col., (2011a y 2013) de 2.77 a 3.67 g H₂O/g, Kannadhasan y col., (2009a y 2009b) de 3.06 a 4.10 g H₂O/g, Fallahi y col., (2013) de 3.31 a 3.85 g H₂O/g y Mjoun y Rosentrater, (2011) de 3.39 a 3.63 g H₂O/g.

4.5 Índice de solubilidad en agua (ISA)

De acuerdo a lo reportado en la literatura, el índice de solubilidad de agua (ISA), puede variar entre 16 a 46 en extrudidos con alto contenido de almidón como en el maíz, y de 11.8 a 35 en extrudidos de frijol, donde el contenido de almidón es bajo y el de proteína alto (Gujska y Khan, 1991a,b; Singh y col., 2006). El ISA está directamente relacionado con el grado de gelatinización del almidón que se produce dentro del extrusor (Harper, 1981), mientras que el grado de gelatinización durante la extrusión, al igual que con el IAA, se ve afectado negativamente por el contenido de grasa y proteína presentes en la dieta a extrudir (Singh y col., 2006; Rodríguez-Miranda y col., 2011; Bisharat y col., 2013). En general, ISA aumenta a medida que aumenta la temperatura, debido a la despolimerización del almidón y de otras macromoléculas presentes en la mezcla (Anderson y col., 1982), dicho efecto también debe de aplicarse para el tamaño molecular de las proteínas. El mayor valor de ISA, se obtuvo en la dieta BF45 con 45% extrudida a 120 °C con el 22% de humedad y el menor fue encontrado en la misma dieta pero extrudida a 150 °C y 22% de humedad, lo cual puede ser atribuido a que durante el proceso de extrusión a altas temperaturas, el almidón sufre una mayor degradación y puede alcanzar una

dextrinización mayor, reduciendo los valores del radio de expansión, acentuándose en mezclas con bajo contenido de almidón (Chinnaswamy y Hanna, 1987; Sacchetti y col., 2005). El efecto negativo que tiene el aumento de la humedad (18 a 22%), probablemente se deba a que durante la extrusión el alto contenido de humedad incrementa el porcentaje de almidón gelatinizado y pueda disminuir la desnaturalización de las proteínas y la degradación del almidón, obteniéndose valores menores de ISA (Hernández-Díaz y col., 2007), debido a la aplicación de valores menores de esfuerzos de corte ocasionados por la disminución de la viscosidad de la mezcla. Las proteínas pueden interactuar con el almidón a través de la formación de enlaces cruzados (Fernández-Gutiérrez y col., 2004). Esto podría evitar la solubilización de la amilosa, disminuyendo así el ISA. La disminución del ISA con la presencia de la proteína ha sido observada también por Matthey y Hanna (1997) y Hashimoto y col. (2002). Los resultados muestran, que el ISA aumento ($p < 0.05$), con respecto a la DC, cuando aumento el contenido de harina de frijol, a 18 y 22% de humedad y 120°C, al igual que a 18% de humedad y 150 °C. Sin embargo, la proteína de frijol, mostro un efecto negativo sobre el ISA, comparado con la DC, cuando se extruyó a 22% de humedad y 150 °C (Tabla 3). El ISA encontrado se encuentra por debajo a lo reportado en la literatura 10.7 a 22.72 (Kannadhasan y col., 2009a, 2009b; Rosentrater y col., 2009a, 2009b; Ayadi y col., 2011a; Mjoun y Rosentrater, 2011; Ayadi y col., 2013; Fallahi y col., 2013).

4.6 Velocidad de hundimiento (VH)

La VH, es una de las características más importantes para la elaboración de alimentos acuícolas, ya que dependiendo de la especie a la que se le suministre el alimento, afectará el rendimiento productivo de los animales. Además de la estabilidad de los productos extrudidos en el agua (ISA, IAA), la VH está estrechamente relacionada con la absorción de agua durante la flotación del alimento en la superficie (Bandyobadhyay y Ranjan 2001; Rolfe y col., 2001; Chevanan y col., 2009; Umar y col., 2013), estas son características físicas determinantes para que el pez tenga más tiempo para consumir la dieta y evitar pérdidas. A menor VH, se permite una mejor apreciación visual del alimento por los peces, evitando así excesos de entrega de dieta, lo cual favorece una mejor eficiencia alimenticia y disminuye el riesgo de contaminación del medio acuático (Castro-González

y col., 1991). La trucha arco iris, por su carácter carnívoro, prefiere alimentos que floten con baja velocidad de hundimiento. La menor VH se encontró en la dieta DC con una velocidad de 2.60 cm/s, extrudida a 150 °C con una humedad de 18%, mientras que la máxima VH se obtuvo en la dieta BF30 (6.21 cm/s) extrudida a 120 °C y 22% de humedad. Cabe destacar que los valores de VH de todas las dietas experimentales, se concentraron dentro del intervalo reportado (de 2 a 11 cm/s) por otros autores (Booth y col., 2000; Chevanan y col., 2007; Umar y col., 2013; Kannadhasan y col., 2009a, 2009b; Rosentrater y col., 2009a, 2009b; Fallahi y col., 2013). La VH depende de la magnitud de la expansión y por tanto de los cambios fisicoquímicos que ocurren dentro del barril. La expansión afecta la densidad de los extruidos. Por otra parte, la magnitud de los cambios fisicoquímicos afecta la capacidad de absorción de agua y la integridad estructural de los extruidos, que también afectan a la VH (Chevanan y col., 2007). El objetivo en la alimentación para trucha, es obtener alimentos de lento hundimiento, esto se obtiene en las dietas con 15% de harina de frijol extrudido a 18% de humedad y 120 °C.

4.7 El color

El color es una propiedad física que a menudo es utilizada por los productores para predecir la calidad del pellet (Valadez-Blanco y col., 2007). Los cambios de color en el proceso de extrusión se deben principalmente a las reacciones de Maillard (Mercier y col., 1989). De hecho, las pérdidas significativas de lisina durante el proceso de extrusión se han observado debido a reacciones de oscurecimiento no enzimático (Björck y Asp 1983; Berset, 1989). El efecto encontrado del incremento de los valores de L* al incrementarse la concentración de harina de frijol (15 a 45%), se debe a que la harina de frijol presenta una coloración más blanca, que al incrementarse en las dietas se obtiene un valor más alto de L*, al igual que al aumentar la temperatura (120 a 150 °C), este valor se incrementó. Una tendencia similar fue observada por Shukla y col. (2005), que al aumentar la temperatura la L* disminuyó. El color de los pellet extrudido tiene una fuerte correlación con el color de las materias primas usadas en su elaboración, por lo tanto al comparar las dietas elaboradas a lo reportado en la literatura se encuentran dentro del intervalo de 33.55 a 66 L*, 3.21 a 8.27 a* y 9.60 a 60.4 b* (Fallahi y col., 2013; Ayadi y col., 2013; Ayadi y col., 2011a, 2011b; Mjoun y Rosentrater, 2011; Kannadhasan y

col., 2009a,2009b; Rosentrater y col., 2009a, 2009b).

Conclusiones

El contenido de proteínas de las dietas extrudidas a base de harina de frijol, presentaron el mismo contenido de proteína que un extrudido para trucha arco iris a base de harina de pescado. La concentración de harina de frijol así como la temperatura y humedad influyeron ($p < 0.05$) en todas las determinaciones. Los alimentos balanceados extrudidos para peces, contienen alta cantidad de grasa ($> 16\%$) y proteína animal, ambos factores que disminuyen el IE y aumentan la DA aun en procesos de extrusión con alta humedad (22%). La humedad y temperatura de extrusión, no mostraron efecto significativo ($p > 0.05$), sobre el índice de absorción de agua. El índice de absorción de agua disminuyo ($p < 0.05$), en todos los tratamientos con harina de frijol, en comparación de la dieta sin harina de frijol. Las velocidades de hundimiento más baja se obtuvieron a 18% de humedad. Para el caso de dietas a base de harina de pescado, sin harina de frijol, se requiere extrudir a 150 °C. Por otra parte, los extrudidos con sustituto de harina de frijol pueden extrudirse a 120 °C, para obtener valores bajos de velocidad de hundimiento. La concentración de proteína de frijol afectó significativamente ($p < 0.05$) el color de los extrudidos, aumentando su luminosidad. Las mejores características físicas fueron encontradas en los extrudidos a 120 °C y 22% de humedad. Los resultados muestran que es factible la incorporación de la harina de frijol para la elaboración de dietas acuícolas con características funcionales comparables con los alimentos balanceados existentes en el mercado.

References

- A.O.A.C (2005). *International Official Methods of Analysis*, 15th ed. The Association of Official Analytical Chemists: Arlington, Va, 2005:Vol. II.
- Ah-Hen, K., Lehnebach, G., Lemus-Mondaca, R., Zura-Bravo, L., Leyton, P., Vega-Gálvez, A. y Figuerola, F. (2014). Evaluation of different starch sources in extruded feed for Atlantic salmon. *Aquaculture Nutrition* 20,183-191.
- Anderson, R.A (1982). Water absorption and solubility and amylograph characteristics on roll-cooked small grain products. *Cereal Chemistry* 59, 265-269.
- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer V.F. y Griffin, E.L. (1969b). Roll and extrusion-cooking of grain sorghum grits. *Cereal Science Today* 14, 372- 381.
- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F. y Griffin E.L (1969a). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today* 14, 4-12.
- Anton, A.A., Fulcher, G.R. y Arntfield, S. D. (2009). Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food Chemistry* 113, 989-996.
- Arhaliass, A., Legrand, J., Vauchel, P., Fodil-Pacha, F., Lamer, T. y Bouvier, J.M. (2009). The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking. *Food Bioprocess Technology* 2,186-193.
- Ayadi, F.Y., Fallahi, P., Muthukumarappan, K. y Rosentrater, K.A. (2011b). Single-screw extrusion modeling effects on extrusion processing parameters and physical properties of DDGS-based Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. 2011 *ASABE Annual International Meeting*, 1-28.
- Ayadi, F.Y., Fallahi, P., Rosentrater, K.A. y Muthukumarappan, K. (2013). Modeling single-screw extrusion processing parameters and resulting extrudate properties of DDGS-based Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. *Journal of Food Research* 2, 11-28.
- Ayadi, F.Y., Muthukumarappan, K., Rosentrater, K.A. y Brown, M.L. (2011a). Single-screw extrusion processing of distillers dried grains with solubles (DDGS)-Based yellow perch (*Perca flavescens*) feeds. *Cereal Chemistry* 88, 179-188.
- Azevedo, A., Gomes, J.C., Stringheta, P.C., Gontijo, A.M.C., Padovani, C.R. y Riberio, L.R.Z. (2003). Black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as a protective agent against DNA damage in mice. *Food and Chemical Toxicology* 41, 1671-1676.

- Bandyobadhyay, S. y Ranjan, K.R. (2001). Aquafeed extrudate flow rate and pellet characteristics from low cost single screw extruder. *Journal of Aquatic Food Product Technology* 10, 3-14.
- Berset, C. (1989). Color. En *Extrusion cooking* (C. Mercier, P. Linko, J y Harper, M., Eds.), (Pp. 371-385). St. Paul, MN.: American Association of Cereal Chemists.
- Bisharat, G.I., Oikonomopoulou, V.P., Panagiotou, N.M., Krokida, M.K. y Maroulis, Z.B. (2013). Effect of extrusion conditions on the structural properties of corn extrudates enriched with dehydrated vegetables. *Food Research International* 53, 1-14.
- Björck, I. y Asp, N.G. (1983). The effects of extrusion cooking on nutritional value. *Journal of Food Engineering* 2, 281-308.
- Booth, M.A., Allan, G.L. y Warner-Smith, R. (2000). Effects of grinding, steam conditioning and extrusion of a practical diet on digestibility and weight gain of silver perch, *Bidyanus bidyanus*. *Aquaculture* 182, 287-299.
- Cabanillas-Beltran, H., Ponce-Palafox, J.T., Arredondo-Figueroa, J.L., Esparza-Leal, H., García-Ulloa, M. (2013). Digestibility of different thermal processed grain of legumes, *Rynchosia minima* and *Cajan cajan*, in white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Asian Journal of Animal Sciences* 7, 36-46.
- Castro-González M.I, Carrillo S, Pérez Gil F, Manzano R, Rosales E (1991). Macrocystis pirifera: Potential resource for animal feeding. *Cuban Journal of Agricultural Science* 25, 77-81.
- Chevanan, N., Muthukumarappan, K. y Rosentrater, K.A. (2009). Extrusion studies of aquaculture feed using distillers dried grains with solubles and whey. *Food Bioprocess Technology* 2, 177-185.
- Chevanan, N., Rosentrater, K.A. y Muthukumarappan, K. (2007). Twin screw extrusion processing of feed blends containing distiller's dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chemistry* 84, 428-436.
- Chinnaswamy, R. y Hanna, M.A. (1987). Optimum extrusion cooking conditions for maximum expansion of corn starch. *Journal of Food Science* 53, 834-836.
- Ditudompo, S., Takhar, P.S., Ganjyal, G.M. y Hanna, M.A. (2013). The effect of temperature and moisture on the mechanical properties of extruded cornstarch. *Journal of Texture Studies* 44, 225-237.
- F.A.O. (2000). Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2000. Editorial Group FAO Information Division, Pp 3-15.
- Fallahi, P., Rosentrater, K.A., Muthukumarappan, K. y Tulbek, M. (2013). Effects of steam, moisture, and screw speed on physical properties of DDGS-Based extrudates. *Cereal Chemistry* 90, 186-197.
- Fernandez-Gutierrez, J.A., Martin-Martinez, E.S., Martinez-Bustos, F. y Cruz-Orea, A. (2004). Physicochemical properties of casein-starch interaction obtained by extrusion process. *Starch/Stärke* 56, 190-198.
- Gujska, E. y Khan K. (1990). Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fractions of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science* 55, 466-469.
- Gujska, E. y Khan, K. (1991b). Functional properties of extrudates from high starch fractions of navy and pinto beans and corn meal blended with legume high protein fractions. *Journal of Food Science* 56, 431-435.
- Gujska, E. y Khan K. (1991a). Feed moisture effects on functional properties, trypsin inhibitor and hemagglutinating activities of extruded bean high starch fractions. *Journal of Food Science* 56, 443-447.
- Harper, J.M. (1981). *Extrusion of Foods*. Vols. I and 2. CRC Press: Boca Raton, Florida, U.S.A.
- Hashimoto, J.M., Nabeshima, E.H., Cintra, H.S., Dias, A.R.G., Bustos, F.M. y Chang, Y.K. (2002). Effect of processing conditions on some functional characteristics of extrusion-cooked cassava starch/wheat gluten blends. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, 924-930.

- Hernández-Díaz, J.R., Quintero-Ramos, A., Barnard, J. y Baladrán-Quintana, R.R. (2007). Functional properties of extrudates prepared with blends of wheat flour/pinto bean meal with added wheat bran. *Food Science and Technology International* 13, 301-308.
- Himadri, K.D., Tapani, M.H., Myllymaki, O.M. y Malkki, Y. (1993). Effects of formulation and processing variables on dry fish pallets containing fish waste. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 61, 181-187.
- Ilo, S., Schoenlechner, R. y Berghofe, E. (2000). Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites* 51, 97-110.
- Kader, M.A., Bulbul, M., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., Nguyen, B.T. y Komilus, C F. (2012). Effect of complete replacement of fishmeal by dehulled soybean meal with crude attractants supplementation in diets for red sea bream, *Pagrus major*. *Aquaculture*, 109-116.
- Kannadhasan, S., Muthukumarappan, K. y Rosentrater, K.A. (2009a). Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and tapioca starch. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition* 1, 6-21.
- Kannadhasan, S., Muthukumarappan, K. y Rosentrater, K.A. (2009b). Effects of starch sources and protein content on extruded aquaculture feed containing DDGS. *Food and Bioprocess Technology* 4, 282-294.
- Kaushik, S. y Médale, F. (1994). Energy requirements, utilization and dietary supply to salmonids. *Aquaculture* 124, 81.
- Kokini, J.L., Lai, L. y Chedid, L.L. (1992). Effect of starch structure on starch rheological properties. *Food Technology* 46, 124-139.
- Lovell, R.T. (1989). *Nutrition and Feeding of fish*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Madeka, H. y Kokini, J.L. (1992). Effect of Addition of Zein and Gliadin on the Rheological Properties of Amylopectin Starch with Low-to-intermediate Moisture. *Cereal Chemistry* 69, 489-494.
- Mambrini, M., Roem, A.J., Cravèdi, J.P., Lallès, J.P. y Kaushik, S.J. (1999). Effects of replacing fish meal with soy protein concentrate and of DL-methionine supplementation in high-energy, extruded diets on the growth and nutrient utilization of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Journal of Animal Science* 77, 2990-2999.
- Matthey, F.P. y Hanna, M.A. (1997). Physical and functional properties of twin-screw extruded whey protein concentrate-corn starch blends. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 30, 359-366.
- Médale, F., Boujard, T., Vallée, F., Blanc, D., Mambrini, M., Roem, A. y Kaushik, S.J. (1998). Voluntary feed intake, nitrogen and phosphorus losses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed increasing dietary levels of soy protein concentrate. *Aquatic Living Resources* 11, 239-246.
- Mercier, C., Linko, P. y Harper, J.M. (1989). *Extrusion Cooking*. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota.
- Mjoun, K. y Rosentrater, K. A. (2011). Extruded aquafeeds containing distillers dried grains with solubles: effects on extrudate properties and processing behavior. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91, 2865-2874.
- Oke, M.O., Awonorin, S.O., Sanni, L.O., Asiedu, R. y Aiyedun, P.O. (2013). Effect of extrusion variables on extrudates properties of water yam flour - a response surface analysis. *Journal of Food Processing and Preservation* 37, 456 - 473.
- Olvera-Novoa, M.A. y Olivera-Castillo, L. (2000). Potencialidad del uso de las leguminosas como fuente proteica en alimentos para peces. Presentación. Noviembre 15-18, 1998. Nutrición Acuicola IV. *Memorias del IV Simposio Internacional de Nutrición Acuicola* La Paz, B.C.S., México.
- Owusu-Ansah, J., van de Voort, F.R. y Stanley D.W. (1984). Textural and microstructural changes in corn starch as a function of extrusion variables. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal* 17, 65-70.

- Park, J., Rhee, K.S., Kim, B.K. y Rhee, K.C. (1993). Single-screw extrusion of defatted soy flour, corn starch and raw beef blends. *Journal of Food Science* 58, 9-20.
- Pérez-Navarrete, C., González, R., Chel-Guerrero, L. y Betancur-Ancona, D. (2006). Effect of extrusion on nutritional quality of maize and Lima bean flour blends. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86, 2477-2484.
- Purushotham, B., Radhakrishna, P.M. y Sherigara, B.S. (2007). Effects of steam conditioning and extrusion temperature on some anti-nutritional factors of soyabean (*Glycine max*) for pet food applications. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences* 2, 1-5.
- Rodríguez-Miranda, J., Ruiz-López, I.I., Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C.E., Delgado-Licon, E. y Vivar-Vera, M.A. (2011). Development of extruded snacks using taro (*Colocasia esculenta*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. *LWT-Food Science and Technology* 44, 673-680.
- Rokey, G. y Plattner, B. (2003). A practical approach to aquafeed extrusion. *Feed Management* 54, 24-26.
- Rolfe, J.B., Ranjit, S.K., Champagne, E.T., Bryan, T.V. y Debbie, B. (2001). Functional and digestive characteristics of extruded rice flour. *Cereal Chemistry* 78, 131-137.
- Rosentrater, K.A., Muthukumarappan, K. y Kannadhasan, S. (2009a). Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition* 1, 22-38.
- Rosentrater, K.A., Muthukumarappan, K. y Kannadhasan, S. (2009b). Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and corn starch. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition* 1, 44-60.
- Sacchetti, G., Pittiam, P. y Pinnavaia, G.G. (2005). The effect of extrusion temperature and drying-tempering on both of kinetics of hydration and the textural changes in extruded ready-to-eat breakfast cereals during soaking in semi-skimmed milk. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 655-663.
- Seth D. y Rajamanickam, G. (2012). Development of extruded snacks using soy, sorghum, millet and rice blend - A response surface methodology approach. *International Journal of Food Science and Technology* 47, 1526-1531.
- Sevgili, H., Emre, Y., Kanyalmaz, M., Diler, I. y Ho?su, B. (2006). Effects of mixed feeding schedules on growth performance, body composition, and nitrogen- and phosphorus balance in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Acta Ichthyologica et Piscatoria* 36, 49-55.
- Shukla, C.Y., Muthukumarappan, K. y Julson, J.L. (2005). Effect of single screw extruder die temperature, amount of distillers dried grains with solubles (DDGS) and initial moisture content on extrudates. *Cereal Chemistry* 82, 34-37.
- Singh, O. y Singh, H. (2006). Physico-chemical and morphological characteristics of New Zealand Taewa (*Maori potato*) starches. *Carbohydrate Polymers* 64, 569-581.
- Singh, S., Gamlath, S. y Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science & Technology* 42, 916-929.
- Stickney, R.R., Hardy, R.W., Koch, K., Harrold, R., Seawright, D. y Masee, K.C. (1996). The effects of substituting selected oilseed protein concentrates for fish meal in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* diets. *Journal of the World Aquaculture Society* 27, 57-63.
- Swick, R.A., Akiyama, D.M., Boonyaratpalin, M. y Creswell, D.C. (1995). Use of soybean meal and synthetic methionine in shrimp feed. American Soybean Association, Technical Bulletin.
- Tapia-Picazo, J.C., García-Chávez, A., Gonzalez-Nuñez, R., Bonilla-Petriciolet, A., Luna-Bárceñas, G., Campión-Coria, A. y Alvarez-Castillo, A. (2014). performance of a modified extruder for polyester fiber production using recycled pet. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13, 337-334.
- Thiessen, D.L., Campbell, G.L. y Adelizi, P.D. (2003). Digestibility and growth performance of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with pea and canola products. *Aquaculture Nutrition* 9, 67-75.

- Umar, S., Kamarudin, M.S. y Ramezani-Fard, E. (2013). Physical properties of extruded aquafeed with a combination of sago and tapioca starches at different moisture contents. *Animal Feed Science and Technology* 183, 51-55.
- Valadez-Blanco, R., Viridi, A.I.S., Balke, S. T. y Diosady, L.L. (2007). In-line colour monitoring during food extrusion: Sensitivity and correlation with product colour. *Food Research International* 40, 1129-1139.
- Van den Einde, R.M., Van der Goot, A.J. y Boom, R.M. (2003). Understanding molecular weight reduction of starch during heating-shearing process. *Journal of Food Science* 68, 396-2904.
- Wang, W.M., Klopfenstein, C.F. y Ponte, J.G. (1993). Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chemistry* 70, 707-711.
- Winham, D.M. y Hutchins, A.M. (2007). Baked bean consumption reduces serum cholesterol in hypercholesterolemic adults. *Nutrition Research* 27, 380-386.
- Zazueta-Morales, J., Martínez-Bustos, F., Jacobo-Valenzuela, N., Ordorica-Falomir, C. y Paredes-López, O. (2002). Effects of calcium hydroxide and screw speed on physicochemical characteristics of extruded blue maize. *Journal of Food Science* 67, 3350-3357.