

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE INGENIERIA EN ALIMENTOS

Efecto de la Utilización de Distintas Fuentes de Almidón en
Alimento Extruído Para Salmónidos

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Ciencia de los Alimentos

Gustavo Lehnebach Miranda

Valdivia – Chile

2006

PROFESORES INFORMANTES

PROFESOR PATROCINANTE

Kong Shun Ah-Hen

Ingeniero en Alimentos

Doctor en Ingeniería, (Dipl. Ing; Dr.- Ing)

Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. _____

PROFESOR INFORMANTE:

Erwin Carrasco Ruiz

Ingeniero Civil Químico

Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. _____

PROFESOR INFORMANTE:

Fernando Figuerola Rivas

Ingeniero Agrónomo, M.S. Food Science

Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. _____

"Aquel que tiene imaginación, pero carece de conocimientos, tiene alas, pero no tiene pies"

Joseph Joubert

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis está dedicada a todas las personas que me ayudaron y me acompañaron desde mi niñez hasta mi examen de grado, a todos ellos “Muchas Gracias!”

Quiero, además, dar un especial agradecimiento a mi Madre, por ser la mejor Madre que pude haber tenido y a quien siempre admiraré. Quiero, también, entregarles muchos cariños a mis hermanos Carlos y Lorena.

Por último, quiero darle las gracias a mis amigos y compañeros de la carrera GG, EH, NP, YO, JP, CC, PD, SS y +; a los profesores del ICYTAL, en forma especial al Profesor Kong Shun por su infinita paciencia y al Profesor Figuerola por insertarme en el mundo laboral; a mis compañeros de trabajo de CETECSAL-SALMOFOOD en especial a SSP, PL, AP y RO por sus continuos apoyos en forma directa, especialmente en lograr mi titulación. A todos ellos Muchas Gracias!.

Gracias Dios por entregarme tanta felicidad en esta vida-.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Almidón	3
2.1.1	Amilosa	4
2.1.2	Amilopectina	4
2.1.3	Proporción amilosa y amilopectina	5
2.1.4	Gránulos de almidón	6
2.1.5	Propiedades del almidón	9
2.1.5.1	Gelatinización	9
2.1.5.2	Formación de pasta	10
2.1.5.3	Retrogradación	10
2.1.5.4	Efectos del pH, fricción y de otros ingredientes	11
2.2	Alimento extruído para peces	13
2.2.1	Fuentes de almidón	13
2.2.2	Proceso de elaboración de alimento para peces	14
2.2.3	Efectos del proceso en los almidones	16
2.2.3.1	Acondicionamiento	16
2.2.3.2	Extrusión	16
2.2.4	Formación del pellet	17
2.2.5	Expansión	18
2.2.6	Porosidad	20

2.2.7	Efectos de otros componentes en la funcionalidad del almidón	21
2.3	Propiedades mecánicas del pellet	23
2.3.1	Firmeza y durabilidad	23
2.3.2	Compresión de pellets	27
3	MATERIAL Y METODO	30
3.1	Ingredientes	30
3.2	Diseño experimental	30
3.3	Elaboración de dietas experimentales	32
3.3.1	Mezclas de materia primas base	32
3.3.2	Molienda	32
3.3.3	Tamizado	32
3.3.4	Conformación de las dietas experimentales	32
3.3.5	Extrusión	32
3.3.6	Toma de muestras	34
3.3.7	Secado	34
3.3.8	Zarandeado	34
3.4	Análisis físico-químicos	34
3.4.1	Absorción de aceite	35
3.4.2	Determinación del porcentaje de gelatinización de almidón	36
3.4.3	Amilogramas	36
3.4.4	Determinación de expansión radial y axial	36
3.4.5	Determinación de la densidad	37
3.4.6	Prueba de durabilidad	37
3.4.7	Prueba de compresión	38
3.5	Análisis estadístico	40
4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	41
4.1	Fabricación de dietas experimentales	41

4.1.1	Determinación de los parámetros experimentales del proceso de extrusión	41
4.1.2	Zarandeado	42
4.2	Análisis físico-químico	45
4.2.1	Absorción de aceite	45
4.2.2	Expansión	48
4.2.2.1	Expansión diametral	48
4.2.2.2	Expansión axial	51
4.2.2.3	Relación entre la expansión radial y la axial	53
4.2.3	Durabilidad	54
4.2.4	Densidad	56
4.2.5	Pruebas de compresión	58
4.3	Análisis global de los ingredientes utilizados	62
4.3.1	Harina de trigo	62
4.3.2	Almidón de tapioca	63
4.3.3	Harina de avena	64
5	CONCLUSIONES	66
6	RESUMEN	68
	SUMMARY	69
7	BIBLIOGRAFÍA	70

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Segmento de la descripción lineal de la amilosa	4
2	Segmento de la estructura ramificada de la amilopectina	5
3	Micrografías electrónicas de gránulos de almidón: maíz, avena, papa, arroz, tapioca y trigo	8
4	Representación esquemática de los cambios, gelatinización, formación de pasta y retrogradación, en los gránulos	11
5	Efectos del cizalle en el perfil de formación de pasta de almidón nativo	12
6	Línea de flujo del proceso de fabricación alimento para peces	15
7	Efecto de distintos ingredientes en la absorción de aceite	21
8	Niveles de grasa interna del pellet en relación a su firmeza	22
9	Efecto de la gelatinización del almidón en la durabilidad	24
10	Comparación de la firmeza en alimento extruído con distintos aglutinantes	25
11	Relación entre la firmeza y la durabilidad	26
12	Curva de fuerza deformación para materiales biológicos con o sin punto de biofluencia	28
13	Micrografías electrónicas de las estructuras internas de dietas experimentales	29
14	Descripción geométrica del diseño simplex-centroide	31
15	Extrusor Bühler de doble tornillo	33

16	Aceitador de laboratorio con sistema de vacío	35
17	Detalle del aceitado al vacío con alimento y aceite	36
18	Equipo de medición de durabilidad Akvasmart	37
19	Superficie respuesta para la generación de fino	44
20	Absorción de aceite y comparación estadística de medias	46
21	Superficie respuesta para la absorción de aceite	46
22	Comparación múltiple del diámetro para cada formulación	49
23	Superficie respuesta del diámetro del pellet	50
24	Comparación múltiple del largo del pellet según formulación	51
25	Superficie respuesta del largo del pellet	52
26	Correlación entre diámetro y largo del pellet	53
27	Correlación entre diámetro y largo del pellet corregido	54
28	Finos y partidos y comparación de medias según formulación	55
29	Superficie respuesta para finos y partidos	56
30	Comparación múltiple de la densidad del pellet	57
31	Superficie respuesta para la variable densidad	58
32	Comparación múltiple de la fuerza de ruptura del pellet	59
33	Comparación múltiple del modulo de elasticidad del pellet	60
34	Esfuerzo en función de la deformación relativa para la prueba de compresión de pellets	61
35	Amilogramas de los ingredientes evaluados	65

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Características de la amilosa y amilopectina	6
2	Caracterización de almidones según su fuente de origen	7
3	Contenido de almidón en materias primas de uso acuícola	14
4	Composición de los ingredientes utilizados	30
5	Fracción másica de cada ingrediente en el 12% de la formulación	31
6	Parámetros experimentales de extrusión	41
7	Resumen de resultados experimentales según formulación	43

1. INTRODUCCION

El explosivo crecimiento de la industria acuícola nacional y sus optimistas proyecciones de desarrollo ha dado origen a una fuerte competencia entre las plantas productoras de alimentos por entregar al mercado un alimento que ya no sólo cumpla con los requerimientos nutricionales de los peces, sino que también cumpla con parámetros de calidad físicos. Esta mayor preocupación por una nueva variable va en respuesta a que Chile, principal productor de salmón a nivel mundial, debe cumplir con exigentes normas de mercados norteamericanos, europeos y japoneses, que no sólo están en función del producto final (carne de salmón), sino que también en las condiciones en que éste ha sido producido. Además de lo anterior, existe una creciente tendencia del consumidor a preferir alimentos que en su elaboración hayan tenido un muy bajo impacto en el medio ambiente.

Los parámetros físicos del alimento adquieren su relevancia debido a que pueden afectar a las variables productivas, económicas y ambientales del negocio, ya que principalmente están asociadas a una pérdida del objetivo principal, que es, entregar la totalidad del alimento a la especie objetivo y además obtener, en las plantas productoras de alimento, una mayor eficiencia productiva generando la menor cantidad de reproceso y/o devoluciones de alimento.

La reciente automatización de los sistemas de alimentación, ha generado un nuevo obstáculo a la calidad física del alimento. Debido a que la mayoría de estos sistemas no son del todo amigables con la estructura del alimento,

producto del estrés mecánico, pueden llegar a generar una gran cantidad de material particulado y/o fracturar el alimento. Además, la nueva tendencia de trabajar con alimento a granel junto con el envío a zonas más alejadas del país y al naciente negocio de las exportaciones. Todo lo anterior hace necesario maximizar la resistencia mecánica del alimento y minimizar la producción de material particulado y/o fracturado, además de adquirir un mayor conocimiento de las materias primas que afectan las propiedades físicas del alimento con el fin de mejorar la productividad de las plantas de alimento y con el objetivo principal de entregar un producto que cumpla a cabalidad con los requerimientos del cliente.

- **Hipótesis**

La utilización de diferentes fuentes de almidón, en la fabricación de alimentos extruídos para salmónidos, produce pellets con distintas características físicas, producidos bajo iguales parámetros de proceso.

- **Objetivo general**

Estudiar el efecto de la utilización de diferentes fuentes de almidón en las características físicas del alimento extruído para salmónes.

- **Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros experimentales del proceso de extrusión utilizando una dieta básica formulada con harina de trigo.
- Determinar las características físicas de los pellets en función de las distintas fuentes de almidón.
- Evaluar el comportamiento global de los almidones de distintas fuentes en las dietas de acuerdo a las características de los pellets elaborados.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

Las propiedades funcionales que entregan los almidones, tanto en los procesos de manufactura como en las características del producto final, están en directa relación con sus componentes químicos y sus estructuras físicas, los cuales son dependientes, principalmente, de su fuente de origen.

2.1 El almidón

El almidón es el segundo biopolímero de mayor abundancia en el mundo. Es sintetizado por las plantas y almacenado en forma de gránulos en órganos tales como semillas, hojas, raíces y tubérculos. Es utilizado como una fuente de energía durante la germinación y el crecimiento (LINDEN y LORIENT, 2000).

El almidón consiste básicamente en un polímero de D-glucopiranosas unidos por enlaces glicosídicos α -1,4 y α -1,6. En la formación de estos enlaces, el carbono número uno (C 1) de una molécula de D-glucopiranososa se une con el carbono número cuatro (C 4) o el carbono número seis (C 6) de otra molécula de D-glucopiranososa adyacente. Debido al grupo aldehído en una de las terminaciones del polímero de almidón, siempre tiene un terminal reductor libre y una terminación no reductora. Los enlaces glicosídicos en el almidón tienen la configuración alfa (α). Este tipo de enlaces está determinado por la orientación del grupo hidroxilo (-OH) en el carbono C1 del anillo piranososa y permite que algunos almidones formen estructuras helicoidales (THOMAS y ATWELL, 2004).

El almidón es una mezcla de dos polisacáridos, amilosa y amilopectina, agrupados en la forma de gránulos parcialmente cristalinos.

2.1.1 Amilosa. Es el constituyente menos abundante en el almidón y sus moléculas son simples y pequeñas (LINDEN y LORIENT, 2000). Es básicamente un polímero lineal (FIGURA 1), constituido por moléculas de D-glucopiranosas unidas casi en su totalidad por enlaces α -1,4. Estudios recientes indican que también presenta algunos enlaces α -1,6 (THOMAS y ATWELL, 2004).

Las moléculas de amilosa tienden a formar estructuras helicoidales. Esta estructura le permite formar complejos con moléculas hidrofóbicas, debido a que en el interior de la hélice se ubican los átomos de hidrógeno (HERMANSSON y SVEGMARK, 1996). Se caracteriza por formar soluciones acuosas que gelifican y retrogradan al enfriarse; en contacto con el yodo forma un complejo de color azul (BADUI, 1998).

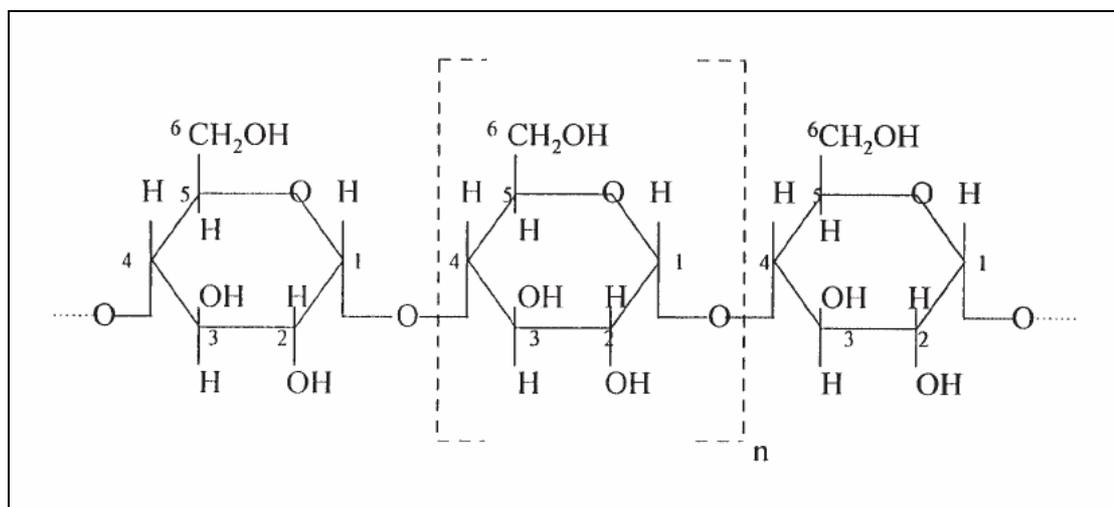


FIGURA 1. Segmento de la descripción lineal de la amilosa

FUENTE: BELITZ y GROSCH (2000)

2.1.2 Amilopectina. Es un polímero ramificado (FIGURA 2), de mayor tamaño que la amilosa, compuesto por moléculas de D-glucopiranosas unidas por enlaces α -1,4 y α -1,6 (THOMAS y ATWELL, 2004).

Las pastas producidas con almidones ricos en amilopectina no forman geles y usualmente tienen una estructura cohesiva y gomosa, además tienen una baja retrogradación. Al contacto con yodo toma un color violeta (BADUI, 1998).

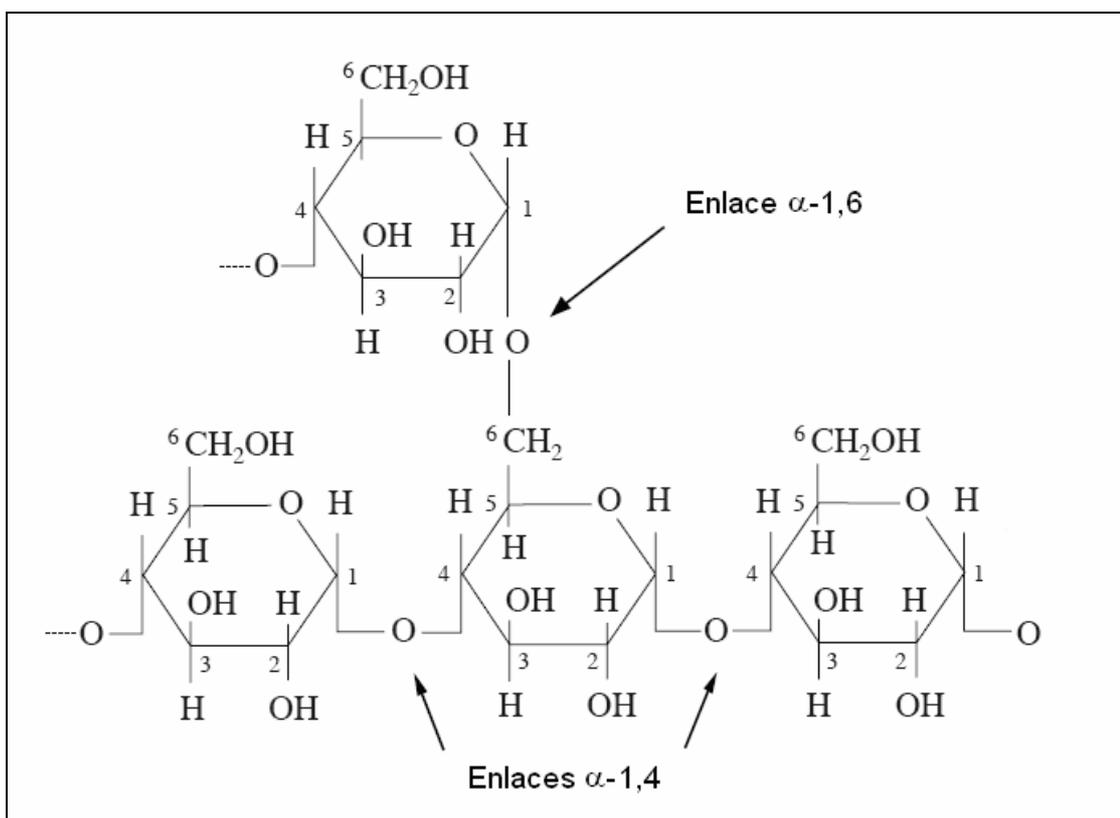


FIGURA 2. Segmento de la estructura ramificada de la amilopectina

FUENTE: BELITZ y GROSCH (2000)

2.1.3 Proporción amilosa y amilopectina. La proporción amilosa y amilopectina que existe en el almidón es un punto muy importante a considerar con respecto a su funcionalidad; esta proporción dicta las conductas de gelatinización y las características del gel o de la pasta resultante (THOMAS y ATWELL, 2004). Comúnmente, el almidón está conformado por un 25 % de amilosa y un 75% de amilopectina (FENNEMA, 2000).

La gelatinización de un almidón con un alto contenido de amilosa, forma un gel firme y cortable; en el caso de uno rico en amilopectina, este presentará un alto pico de viscosidad seguido por un quiebre durante el calentamiento sin formación de gel. Después del enfriado, la pasta resultante es considerada cohesiva y viscoelástica (THOMAS y ATWELL, 2004).

CUADRO 1. Características de la amilosa y amilopectina.

Característica	Amilosa	Amilopectina
Forma	Esencialmente lineal	Ramificada
Enlaces	α -1,4 (algunos α -1,6)	α -1,4 y α -1,6
Peso molecular (D)	Típicamente < 0,5 millones	50 a 500 millones
Películas	Fuertes	Débiles
Formación de gel	Firme	No forma
Color con yodo	Azul	Café rojizo

FUENTE : THOMAS y ATWELL (2004) y BADUI (1998).

2.1.4 Gránulos de almidón. La amilosa y la amilopectina existen como agregados semi-cristalinos llamados gránulos. A medida que la planta produce moléculas de almidón, éste es depositado en sucesivas capas en forma radial alrededor de un hilo central en orden tal de formar un grano compacto; para ello, las moléculas de amilosa y amilopectina se combinan por medio de enlaces de hidrógeno distribuyéndose, al parecer, en forma homogénea (LINDEN y LORIENT, 2000).

El diámetro de los granos, generalmente, se encuentra entre 1 y 100 μm y su forma puede ser regular (esférica, ovoide, etc.) o levemente irregular. En algunos casos, se presenta más de una distribución de tamaño y forma (THOMAS y ATWELL, 2004). En el CUADRO 2 se indican las características del almidón según su fuente de origen, información que es claramente interpretada al ver la FIGURA 3.

CUADRO 2. Caracterización de almidones según su fuente de origen.

Fuente del almidón	Amilosa (%)	Amilopectina (%)	Diámetro (µm)	Forma del gránulo	Temperatura de gelatinización (°C)
Amilo-maíz	50 – 70	30 – 50	3 – 24	Redondo, deforme	67 – 92
Arroz	17	83	3 – 8	Poligonal, angular	68 – 78
Arrurruz	21	79	15 – 70	Oval, truncado	62 – 70
Arveja	33 - 49	51 – 77	5 – 40	Redondo, oval, esférico	55 – 61
Avena	24	76	3 – 10	Poliédrico	53 – 59
Maíz	28	72	3 – 26	Redondo, poliédrico	62 – 72
Maíz ceroso	0	100	3 – 26	Redondo, poliédrico	63 – 72
Papa	20	80	5 – 100	Oval, esférico	50 – 68
Tapioca	16	84	4 – 35	Oval, truncado	49 – 65
Trigo	30	70	2 – 38	Lenticular, redondo	58 – 64
Sagú	26	74	5 – 65	Oval, truncado	60 – 77
Sorgo	28	72	15	Redondo (gránulo compuesto)	71 – 80

FUENTE: RATNAYAKE y JACKSON (2003).

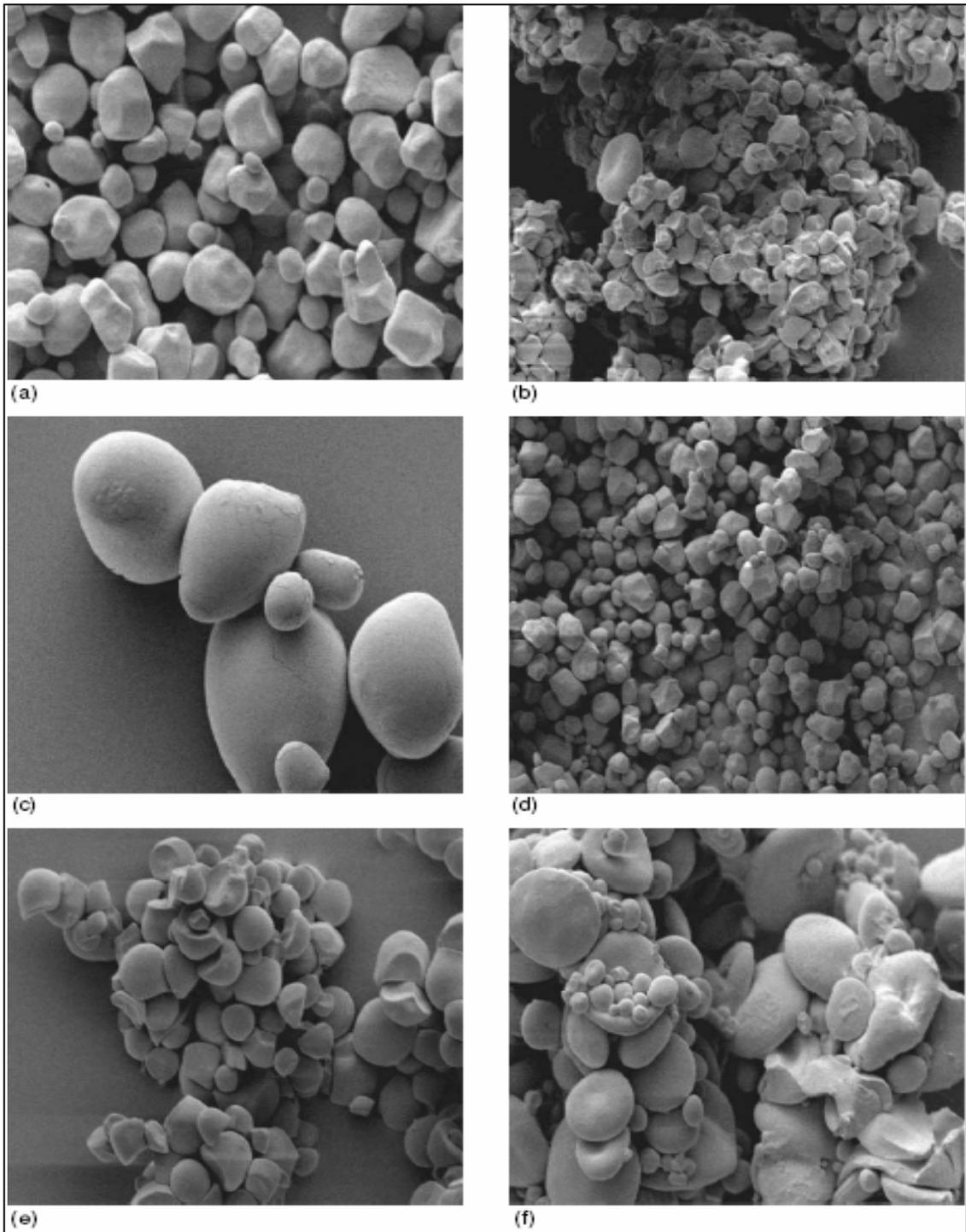


FIGURA 3. Micrografías electrónicas de gránulos de almidón: maíz (a), avena (b), papa (c), arroz (d), tapioca (e) y trigo (f)
Escala 1 : 1000

FUENTE: JACKSON (2003).

El gránulo de almidón es insoluble en agua fría y solo se hidrata levemente. Frente a la luz polarizada con lentes de Nicol, los gránulos, son birrefringentes y se puede observar una cruz oscura con centro en su hilo (FENNEMA, 2000).

2.1.5 Propiedades del almidón. Es importante comprender que las características funcionales de un gránulo de almidón están determinadas por las propiedades del gránulo completo y no necesariamente solo a sus componentes (amilosa y amilopectina). Además, las características funcionales del almidón, en una aplicación dada, pueden no ser totalmente el resultado de la composición química del gránulo y puede estar determinada por las propiedades físicas del gránulo (LYNN *et al.*, 1997).

2.1.5.1 Gelatinización. La gelatinización está definida como el colapso o disrupción a nivel molecular dentro del gránulo de almidón manifestando cambios irreversibles en propiedades como hinchamiento del gránulo, derretimiento de la estructura cristalina, pérdida de la birrefringencia y solubilización del almidón. El punto de inicio de la gelatinización y el rango sobre el cual ocurre es gobernado por la concentración del almidón, el método de observación, el tipo de gránulo y la heterogeneidad de la población de gránulos en observación (ATWELL *et al.*, 1988).

Un exceso de agua es necesario para que pueda ocurrir una completa gelatinización. La disrupción a nivel molecular requiere de una aplicación de energía, la cual generalmente, es entregada mediante la aplicación de calor (LYNN *et al.*, 1997).

Se cree que el hinchamiento inicial toma lugar en la región amorfa del gránulo, donde los enlaces de hidrógeno son menos numerosos y el polímero es más susceptible a la disolución. A medida que la estructura comienza a debilitarse, el gránulo embebe el agua y se hincha (THOMAS y ATWELL, 2004).

La temperatura en la cual el almidón comienza a presentar estos cambios se le denomina temperatura de gelatinización. Debido a que no todos los gránulos comienzan a gelatinizarse a la misma temperatura existen diferentes grados de disrupción estructural e hinchamiento, por lo tanto, la temperatura de gelatinización es definida por un estrecho rango y no como una temperatura específica (THOMAS y ATWELL, 2004).

2.1.5.2 Formación de pasta. La formación de pasta es el fenómeno que ocurre a continuación de la gelatinización en la solución de almidón, comprende el hinchamiento granular, la exudación de componentes moleculares desde el gránulo y eventualmente, la disrupción total de los gránulos (ATWELL *et al.*, 1988).

La viscosidad de la pasta llega al máximo cuando se obtiene el mayor porcentaje de hinchamiento de gránulos intactos, esto es llamado pico de viscosidad (FIGURA 4). En este punto se considera que el almidón está actuando totalmente en la formación de la pasta (THOMAS y ATWELL, 2004). Si continua el calentamiento del almidón se obtiene un decremento en la viscosidad debido a una disolución de los gránulos y solubilización de los polímeros. Si el calentamiento continua aún más, se produce la lixiviación de amilosa y más tarde se produce la liberación de amilopectina, los gránulos comienzan a quebrarse y se pierde la integridad estructural del gránulo (LYNN *et al.*, 1997)

2.1.5.3 Retrogradación. La retrogradación es el proceso que ocurre cuando las cadenas de almidón comienzan a reasociarse en una estructura ordenada. En su fase inicial, dos o más cadenas de almidones pueden formar un simple punto de unión, en el cual puede desarrollarse un ordenamiento extensivo a toda una región y bajo condiciones favorables, presentar un ordenamiento cristalino (ATWELL *et al.*, 1988).

La retrogradación es especialmente evidente cuando el almidón tiene un alto contenido de amilosa y es enfriado. Después del enfriamiento, hay una menor disponibilidad de energía para mantener separadas las moléculas de almidón solubilizado, dando lugar a la formación de agregados cristalinos y a una textura de gel. Con el tiempo, este gel se torna gomoso y tiene la tendencia a liberar agua; a esta liberación se le denomina sinéresis y es común en productos como salsas que ha sido formuladas con amilosa (THOMAS y ATWELL, 2004).

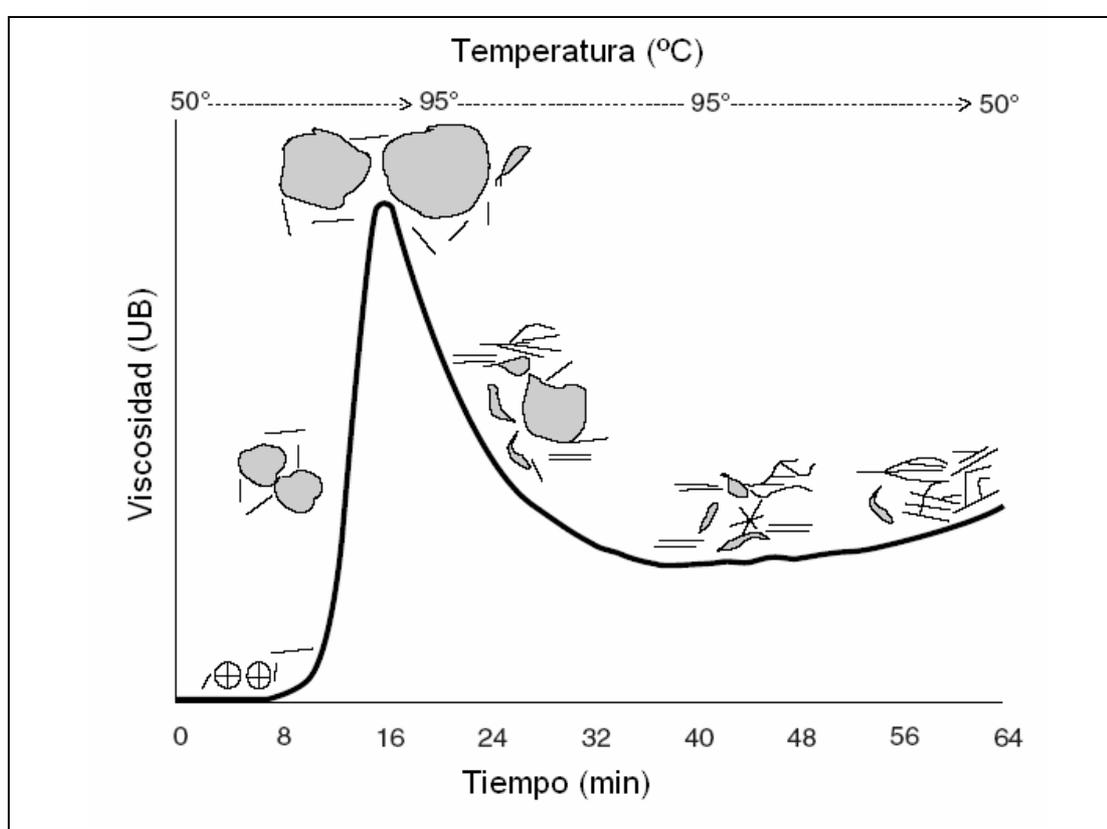


FIGURA 4. Representación esquemática de los cambios, gelatinización, formación de pasta y retrogradación, en los gránulos.

FUENTE: BELITZ y GROSCH (2000)

2.1.5.4 Efectos del pH, cizalle y de otros ingredientes. En general los pH extremos tienden a tener un impacto negativo en la viscosidad del almidón,

debido principalmente a la hidrólisis de enlaces y disrupción de la integridad molecular del gránulo (FENNEMA, 2000).

El cizalle tiene una influencia importante en el comportamiento del almidón. Como se muestra en la FIGURA 5, una combinación de calor y fricción puede tener un drástico efecto en la gelatinización del almidón y en la viscosidad de la pasta. Este efecto tiene un fuerte impacto, principalmente, en los almidones nativos (THOMAS y ATWELL, 2004).

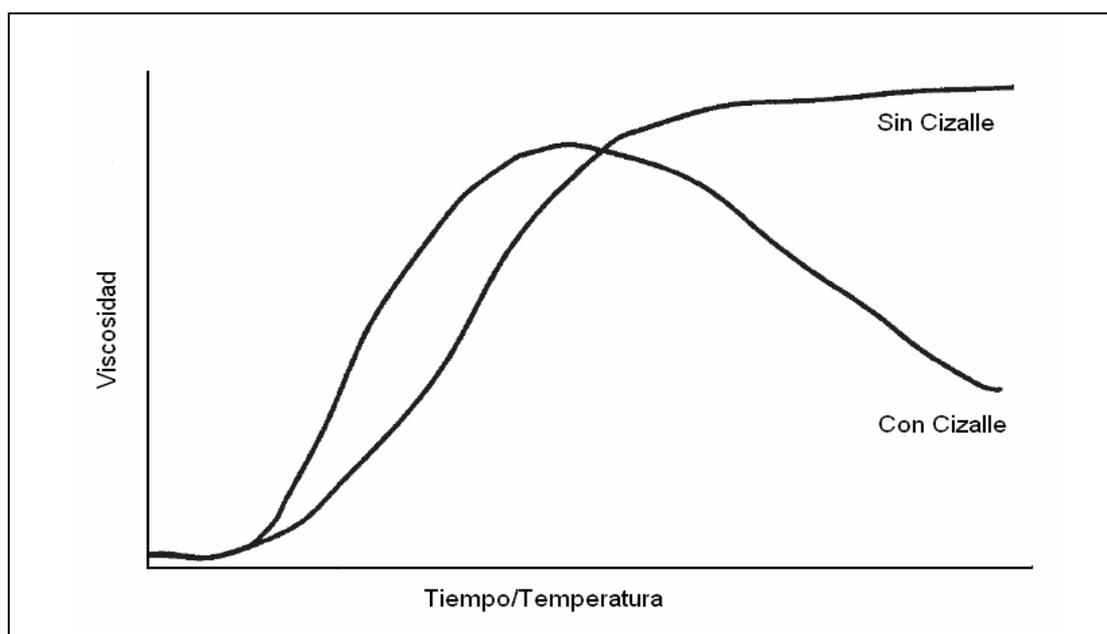


FIGURA 5. Efectos del cizalle en el perfil de formación de pasta de almidón nativo.

FUENTE: THOMAS y ATWELL (2004)

Los ingredientes como grasas, azúcares, proteínas y sales pueden influir en la gelatinización del almidón, en la formación de la pasta y en la retrogradación. En general, cualquier ingrediente que pueda interactuar con el gránulo o competir por el agua disponible, puede tener un impacto negativo en la viscosidad. En el caso de las grasas, tienen la tendencia a interactuar con los

gránulos de almidón e impedir la completa hidratación, obteniéndose un bajo desarrollo de la viscosidad. Los azúcares y otros sólidos limitan la gelatinización y la formación de pasta debido a la competición del agua disponible. Las proteínas y las sales pueden también alterar el desempeño del almidón y deben ser considerados en formulaciones de alimentos que contienen almidón (THOMAS y ATWELL, 2004).

2.2 Alimento extruído para peces

La extrusión de alimento acuático fue desarrollado a fines de 1950. Desde el inicio a la fecha, un gran número de avances tecnológicos han logrado mejorar la habilidad de manipular y fabricar eficientemente los alimentos acuáticos. Debido a la complejidad del proceso de extrusión y principalmente a las interacciones entre las materias primas, hace que esta operación se encuentre más cerca de un arte que a una ciencia con aplicaciones de leyes bien definidas (STRAHM y PLATTNER, 2001).

2.2.1 Fuentes de almidón. El alimento para peces es sostenido por una matriz de almidón cocido (NEASE y TEDMAN, 2003). El almidón, en el caso de los alimentos para salmónidos, no juega un rol importante del punto de vista nutricional y se incluye en la formulación de dietas sólo con fines tecnológicos (KEARNS, 1998; FORSTER y HARDY, 2000) contribuyendo, principalmente, a la aglutinación o cohesión del producto final (WENGER MANUFACTURING, 1993).

Las principales materias primas utilizadas como fuente de almidón son el trigo y sus subproductos debido a su alta disponibilidad y bajo costo (KEARNS, 1998).

En el CUADRO 3, se indican algunos ingredientes de uso acuícola junto a su contenido habitual de almidón.

CUADRO 3. Contenido de almidón en materias primas de uso acuícola.

Materia prima	Almidón (% B. S.)
Maíz	70 – 75
Harina de trigo blando	75 – 80
Trigo duro	52 – 65
Harina de trigo duro	82
Harinilla de trigo duro	21
Cebada	60
Avena	45

FUENTE: WENGER MANUFACTURING (1993).

2.2.2 Proceso de elaboración de alimento para peces. Consiste básicamente en someter una mezcla balanceada de ingredientes premolidos y de diversa naturaleza, a condiciones de alta temperatura y humedad mediante la inyección de vapor y/o agua, proceso llamado acondicionamiento, luego la mezcla es sometida a un esfuerzo de corte producido por uno o dos tornillo sin fin de paso variable dentro de un barril, el cual puede estar calefaccionado o enfriado, por ultimo, es forzada a pasar a través de una pequeña abertura. Este proceso, llamado cocción-extrusión, es considerado como un proceso de alta temperatura y corto tiempo (HTST, high temperature short time) debido a que se utilizan temperaturas entre 100 - 120 °C por un tiempo no superior a los 60 segundos. El proceso de extrusión ocurre entre las 25 a 30 atmósferas de presión (KEARNS, 1998; HSIEH, 1999; FRAME, 1994).

En el área de tecnología de extrusión el termino “cocción” se refiere al fenómeno presentado por una combinación de dos procesos, gelatinización y derretimiento (WANG *et al.*, 1991).

En la FIGURA 6 se muestra un esquema del proceso de elaboración de alimento extruído para peces.

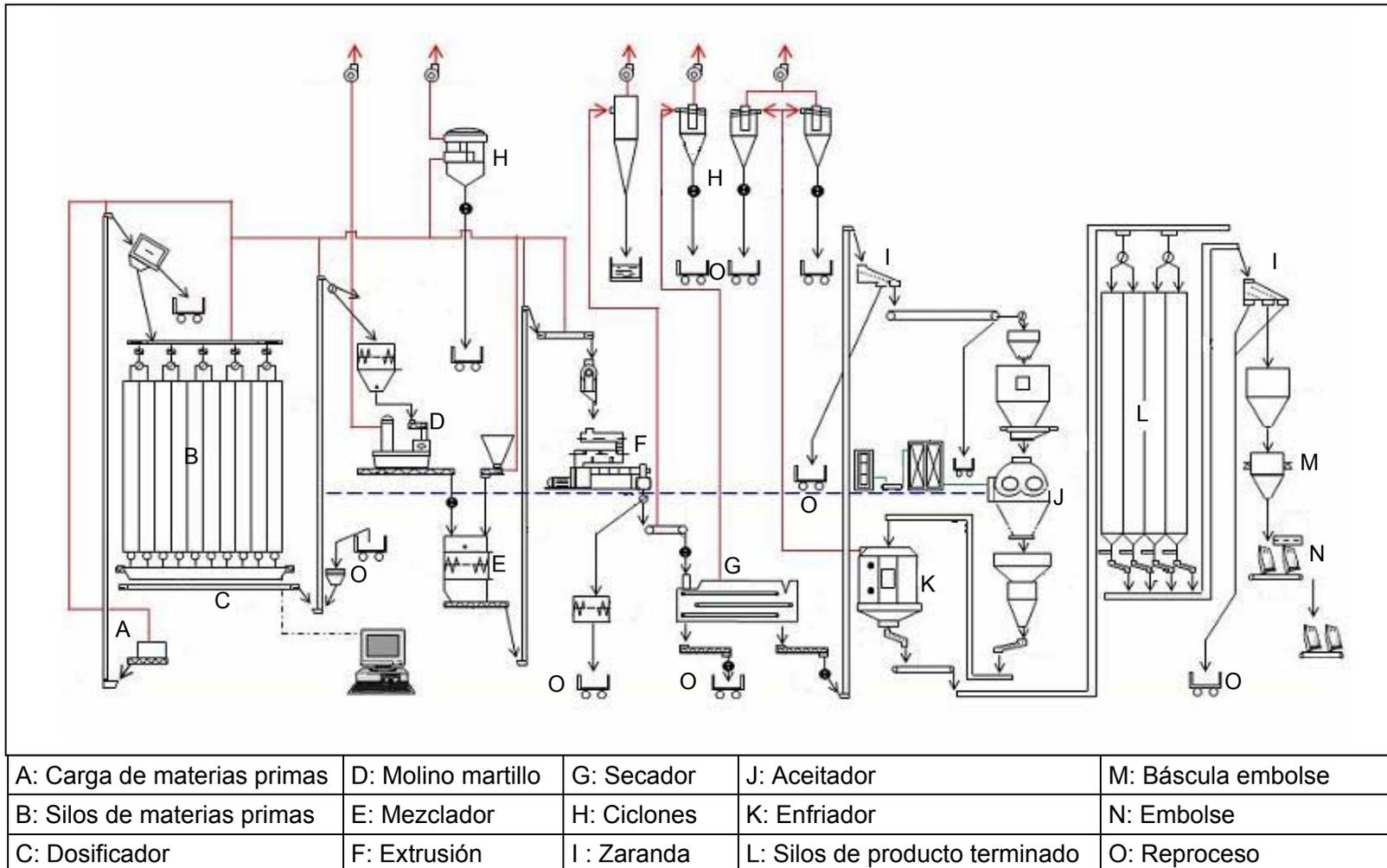


FIGURA 6. Línea de flujo del proceso de fabricación de alimentos para peces.

2.2.3 Efectos del proceso en los almidones. La cantidad de almidón gelatinizado durante el proceso depende del tipo de almidón, del tamaño y forma de los gránulos y de sus condiciones de procesamiento. La operación del acondicionador o del extrusor pueden afectar de forma importante la gelatinización del almidón durante el proceso (ROKEY y PLATTNER, 2003).

2.2.3.1 Acondicionamiento En este proceso se inicia la gelatinización del almidón, la cual es dependiente de tres factores: calor, humedad y tiempo. El calor es suministrado por el vapor, ya sea por contacto o por condensación, y que en condiciones ideales debe estar seco (MONCADA, 1996)

Según THOMAS *et al.*, (1999) en el acondicionador se produce solo una gelatinización parcial del almidón, pero un prolongado periodo de tiempo incrementa la combinación de los efectos de calor, fricción y agua, aumentando el grado de gelatinización de los almidones (LUND, 1984).

2.2.3.2 Extrusión. En este proceso, un aumento de la temperatura y la humedad producen una buena cocción de la pasta. Una buena cocción gelatinizará totalmente los almidones, produciendo su solubilización y absorción de grandes cantidades de agua (WENGER MANUFACTURING, 1993) convirtiendo a la mezcla de ingredientes en una masa elástica y pegajosa que puede ser expandida cuando el producto es descargado.

Las condiciones de operación del extrusor juegan un rol muy importante. Operar el extrusor a altas temperaturas y baja humedad, gelatiniza los almidones y pueden llegar a ser convertido en dextrinas (RIAZ, 1997). El tiempo de retención y la inyección de vapor, contribuyen al proceso de gelatinización dando las características al producto final (ROKEY y PLATTNER, 2003).

Una baja fricción del tornillo deja la mayoría de los gránulos intactos y al contrario, un incremento de la fricción produce un aumento de la solubilidad. (ROKEY y PLATTNER, 2003). Cabe destacar que al aumentar la fricción también aumenta el tiempo de retención, permitiendo que las partículas absorban más agua lo cual, facilita su hinchamiento y aumenta la susceptibilidad de ser cizalladas (THOMAS., *et al* 1999).

2.2.4 Formación del pellet. Los pellets son materiales heterogéneos que contienen agua e ingredientes con un tamaño de partícula variable. Debido a que contiene poros de diferentes tamaños, se le considera compuestos de tres fases: sólida, líquida y gaseosa (THOMAS y VAN DER POEL, 1996).

Su estructura es creada por la formación de un fluido derretido proveniente de biopolímeros y del afloramiento de burbujas de vapor de agua en el fluido, dando origen a una espuma. La capa (película) del biopolímero deja fluir las burbujas fácilmente, permitiendo que éstas expandan al salir del extrusor, con igual rapidez que el agua sobrecalentada es liberada a la atmósfera. La pasta fluida del polímero forma la pared de las celdas de las burbujas de aire. Después de la expansión, se produce un rápido descenso de la temperatura causado por la evaporación y ambos producen un aumento en la viscosidad al punto que se rigidiza la estructura (GUY, 2001).

Según la clasificación de ingredientes establecida por GUY (1994), y adoptada por la CCFRA (Campden and Chorleywood Food Research Association), para desarrollar un mejor entendimiento del proceso de cocción-extrusión se debe realizar una agrupación de los ingredientes de acuerdo a su rol funcional usando un enfoque fisicoquímico (GUY, 2001). Bajo esta agrupación, el almidón se ubica principalmente en el grupo de los materiales formadores de estructura (GUY, 1994). Estos, deben poseer un peso molecular mínimo, suficiente para dar la viscosidad al fluido y prevenir o controlar el encogimiento del extruído.

Después de alcanzar su máxima expansión debe permitir el rompimiento de las celdas. Si el polímero es demasiado viscoso, producirá un encogimiento y una pérdida de la expansión del extruído. Esto ocurre, sólo si se ha sobre cocido el almidón llegando al nivel de maltodextrinas o dextrosa. Al contrario, una baja viscosidad producirá un colapso del pellet al momento de la expansión (GUY, 2001).

2.2.5 Expansión. Este término es utilizado para describir el evento que lidera la formación de productos expandidos. Es dependiente de numerosos factores, teniendo mayor peso la cantidad de almidón, su grado de gelatinización y la generación de una importante caída de presión en la matriz. Esta última causa una rápida ebullición del agua (flash off), formando fuertes estructuras celulares y desarrollando un rápido enfriamiento por evaporación (CAMIRE *et al.*, 1990).

La cantidad de almidón juega un rol muy importante en el alimento para peces. Su cantidad está en función al 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. En ambos casos se debe extruír con un 20 a 30% de humedad (ROKEY y PLATTNER, 2003; RIAZ, 1997; WENGER MANUFACTURING, 1993). 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 el nivel de almidón requerido significativamente (ROKEY y PLATTNER, 2003; WENGER MANUFACTURING, 1993).

Un alto contenido de almidón hará que la pasta sea más elástica y evitará que el vapor escape a través de los poros del pellet durante la expansión; éste

mismo efecto lo produce un aumento en la cantidad de agua adicionada a la pasta (MUNZ, 2004).

Según CAMIRE *et al.* (1990) el contenido de amilosa y amilopectina tiene un importante efecto en la expansión. Almidones con bajo nivel de amilosa produce grandes expansiones, en cambio almidones con altos niveles de amilopectina producen pobres expansiones; por otro lado, HARPER (1986) observó que la expansión disminuye a medida que incrementa el contenido de amilosa e informa que con un mayor contenido de amilopectina se obtiene una mayor expansión siempre y cuando ésta no sea sometida a un daño mecánico, lo cual es altamente probable debido al gran tamaño de la molécula. Este almidón dañado, presentaría una menor cohesividad, consecuentemente expandiría menos, predominantemente en la dirección longitudinal.

Según GUY (2001), los almidones ricos en amilosa, como el amilo-maíz, permiten un mejor flujo de las burbujas por las paredes de la pasta obteniéndose una mayor expansión. En cambio los almidones con un alto contenido de amilopectina producen pobres propiedades de flujo en las celdas de aire y se obtiene una pequeña expansión, pero si se utiliza altos niveles de esfuerzo mecánico durante la cocción-extrusión se reduce su tamaño.

Los almidones de tubérculos como papa o tapioca entregan una gran expansión comparado con los almidones de uso común en alimento para peces, como el trigo estándar o maíz (KEARNS, 1998).

ALVAREZ-MARTINEZ *et al.* (1988) ratifica los estudios de Launay y Lisch, de los cuales se infiere que existe una relación inversa entre la expansión radial y la longitudinal. La expansión radial es dependiente de la elasticidad de la pasta siendo mayor, cuando la elasticidad es mayor. En el caso de la expansión longitudinal, incidiría la viscosidad de la pasta y en este caso a una baja

viscosidad se obtiene una mayor expansión longitudinal. Según ALVAREZ-MARTINEZ *et al.* (1988) la elasticidad de la pasta estaría dada por el contenido de amilopectina.

Según FAUBION y HOSENEY, (1982a y 1982b) el gluten produce una disminución de la expansión del extruído.

La humedad en el procesamiento también es un factor importante. Una mayor adición de agua produce un producto de menor densidad y, por el contrario, al adicionar menos agua se obtiene un producto de mayor densidad debido a que contribuye a la cocción del almidón, lo cual permite que el producto expanda. Además, altos niveles de humedad tienden a disminuir la viscosidad del material en el barril del extrusor siendo más difícil su expansión (ROKEY y PLATTNER, 2004).

El manejo de la energía es esencial para controlar la densidad de los alimentos extruídos para peces. A medida que aumenta la entrada de energía durante el proceso de extrusión, la densidad gradualmente disminuye. Existe una fuerte correlación lineal entre la energía mecánica específica y la densidad del producto final (ROKEY y PLATTNER, 2004).

2.2.6 Porosidad. La repentina expansión que se produce al salir el producto a través de la matriz produce la formación de estructuras porosas, las cuales están relacionadas directamente con el contenido de hidratos de carbono presentes en la formulación. Una mayor cantidad de poros produce una menor densidad y una mayor capacidad de absorción de aceites (GILL, 2002).

Según YOSHITOMI (2004) los pellets que presentan grandes expansiones tienen grandes poros o celdas en su interior y pellets de baja expansión presentan poros pequeños; esta variación sería producto de un cambio en la

temperatura de extrusión y la presión, lo cual cambia el grado de licuefacción del material. A medida que se aumenta la temperatura aumenta el tamaño de los poros. En general, la densidad aumenta y el tamaño de poros disminuye al incrementar la humedad del proceso o al disminuir la velocidad del tornillo (BARRETT y PELEG, 1992).

SUNDERLAND (1996) condujo una serie de experimentos para investigar el efecto de varios microingredientes en la calidad del alimento para peces, evaluando la absorción de aceite producto de la porosidad del pellet. De acuerdo a su investigación el almidón de tapioca absorbe la mayor cantidad de aceite (FIGURA 7).

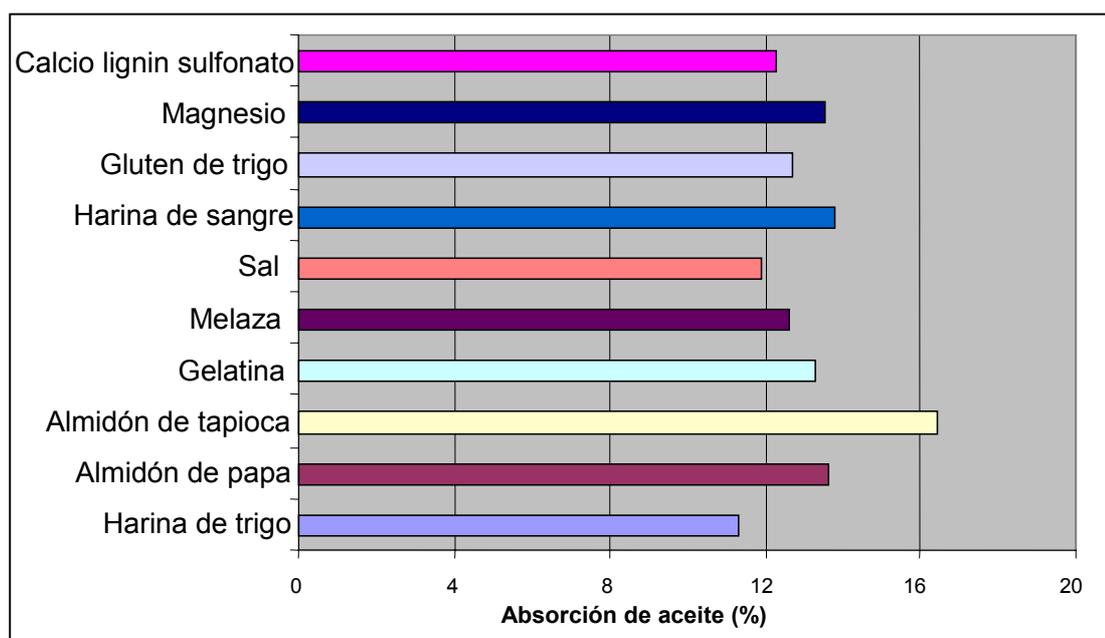


FIGURA 7. Efecto de distintos ingredientes en la absorción de aceite.

FUENTE: SUNDERLAND (1996).

2.2.7 Efectos de otros componentes en la funcionalidad del almidón. La relación entre la funcionalidad del almidón y la calidad del pellet está influenciada por otros componentes del alimento, afectando principalmente la gelatinización del almidón.

La proteína es uno de los principales componentes del alimento en competir por el agua disponible y a una menor cantidad de agua disponible se requiere de mayor energía para poder cocinar el almidón (NEASE y TEDMAN, 2003).

Un factor importante es el contenido de lípidos de la mezcla a extruir o la adición de lípidos al proceso. A medida que se incrementa el contenido de lípidos la firmeza del pellet disminuye (FIGURA 8) ya que estos hacen que el almidón sea más difícil de cocer, debido a que la grasa cumple un efecto lubricante en el extrusor disminuyendo así la entrega de energía (menor fricción), esto debilita la matriz del producto y reduce la resistencia del pellet (ROKEY y PLATTNER, 2004; RIAZ, 1997).

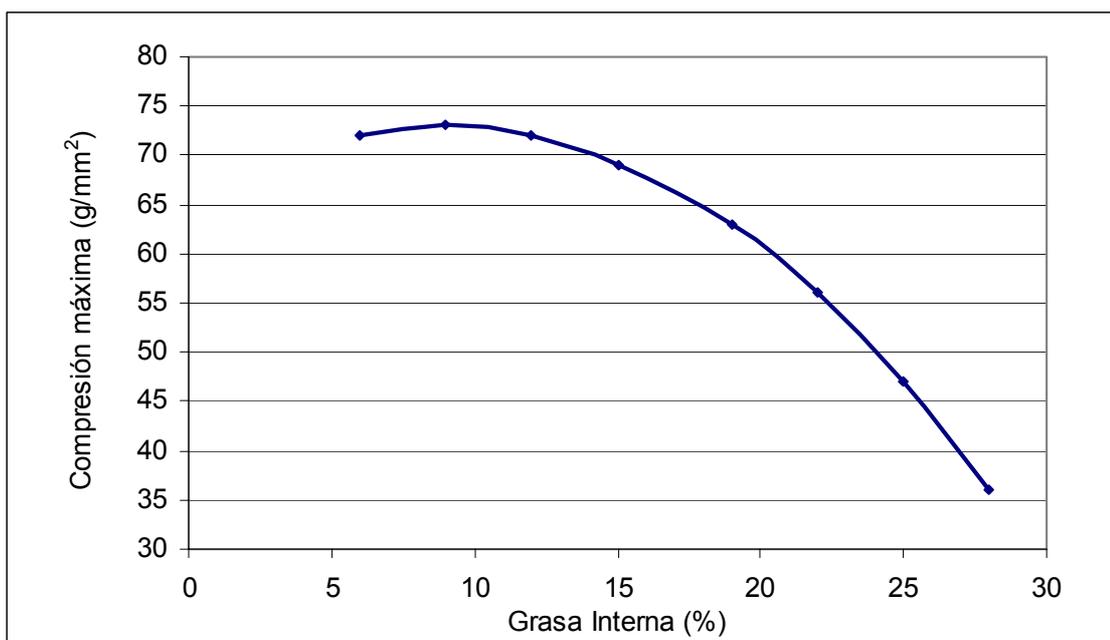


FIGURA 8. Niveles de grasa interna del pellet en relación a su firmeza.

FUENTE: ROKEY y PLATTNER (2003).

La firmeza de los pellets disminuye significativamente si se adiciona más de un 12 % de lípidos en el proceso de extrusión (ROKEY y PLATTNER, 2003).

Según RIAZ (1997) con una concentración de un 8 a 10% de grasa se produce este efecto junto con una disminución en la expansión.

2.3 Propiedades mecánicas del pellet

Las empresas elaboradoras de alimentos extruidos requieren que el pellet mantenga su integridad física hasta el momento que este sea consumido por el animal. En el transcurso desde que se tiene el pellet actúan en él fuerzas dinámicas causadas principalmente por los sistemas de transporte como tornillos sin fin, sistemas neumáticos y durante el llenado o vaciado de un silo o una bolsa. Durante su almacenaje en silos o en pallets los pellets también están sometidos a fuerzas estáticas causadas por el propio peso de los pellets (THOMAS y VAN DER POEL, 1996).

Los pellets no sólo deben resistir el manejo dentro de la planta de alimentos, sino que también, debe resistir el rigor del transporte hasta el sitio objetivo y el daño mecánico causado por los sistemas de alimentación. Esto es de gran importancia debido a que los peces no consumen los finos, durante la alimentación, generando así impactos en la eficiencia del alimento y posiblemente efectos negativos en el medio ambiente (ROKEY y PLATTNER, 2004).

2.3.1 Firmeza y durabilidad. Se entiende por firmeza a la fuerza necesaria para romper el pellet y por su durabilidad, a la cantidad de fino que éstos entregan al ser sometidos a una agitación mecánica o neumática (THOMAS y VAN DER POEL, 1996).

La ruptura del pellet es causada por la concentración de las fuerzas en un punto donde existe de antemano una grieta o defecto. La resistencia a la fractura puede depender de las propiedades funcionales de las materias primas y de las

condiciones de proceso, la adición de ligantes, y por la fuerza de los enlaces interpartículas (THOMAS y VAN DER POEL, 1996).

Para producir pellets con ciertos estándares de calidad en términos de firmeza y durabilidad, el almidón debe ser modificado por el proceso de manufactura del alimento debido a que el almidón nativo, por si mismo, no posee funcionalidad en términos de cohesión (THOMAS y VAN DER POEL, 1996).

WOOD (1987) demuestra que la gelatinización de almidón incrementa la firmeza del pellet y su durabilidad mediante la experimentación con almidones nativo y modificados (FIGURA 9). Además indica que el almidón tiene un mínimo efecto en la calidad del pellet cuando éste es producido junto a proteínas en estado nativo y su efecto sólo es considerable cuando el almidón es gelatinizado y se produce la desnaturalización proteica.

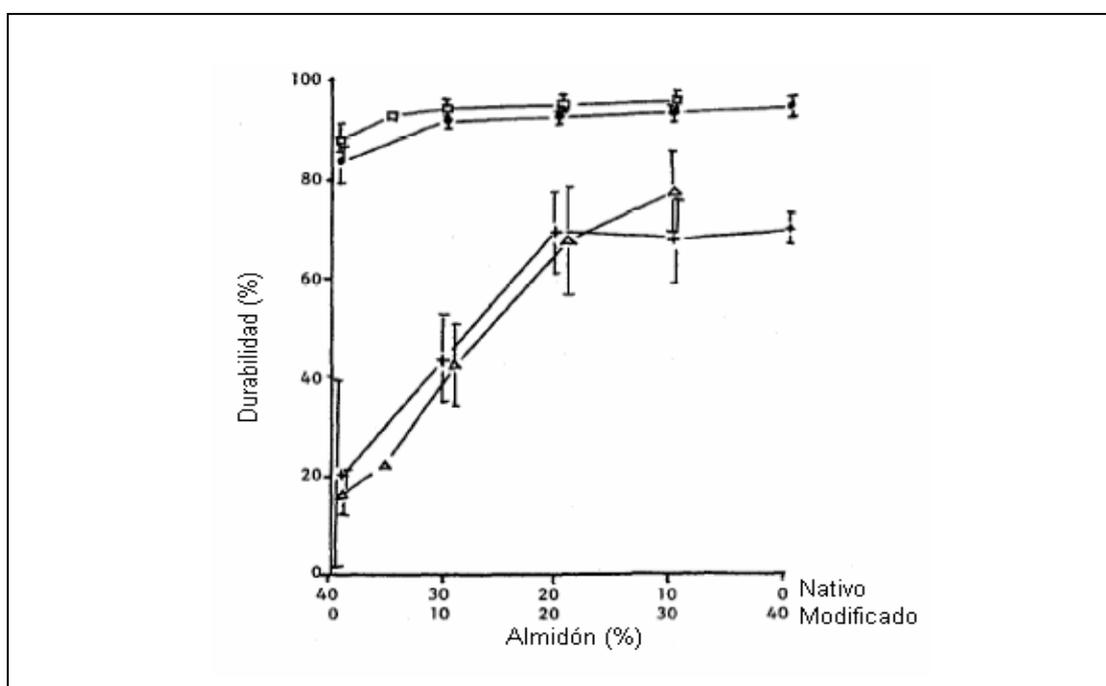


FIGURA 9. Efecto de la gelatinización del almidón en la durabilidad.

FUENTE: WOOD (1987).

Según WENGER MANUFACTURING (1993), la fracción de amilosa del almidón tiene grandes propiedades ligantes (cohesivas) en contraste con la fracción de amilopectina. Almidones provenientes de tubérculos y otros que contengan un alto contenido de amilosa son la mejor alternativa para mejorar la cohesividad del producto final.

SUNDERLAND (1996) condujo una serie de experimentos para investigar la adición de varios microingredientes en la calidad del alimento para peces, evaluando la firmeza; de acuerdo a su investigación la adición de calcio lignin sulfato hace que los pellets sean más duros en comparación con los elaborados con otros ingredientes (FIGURA 10).

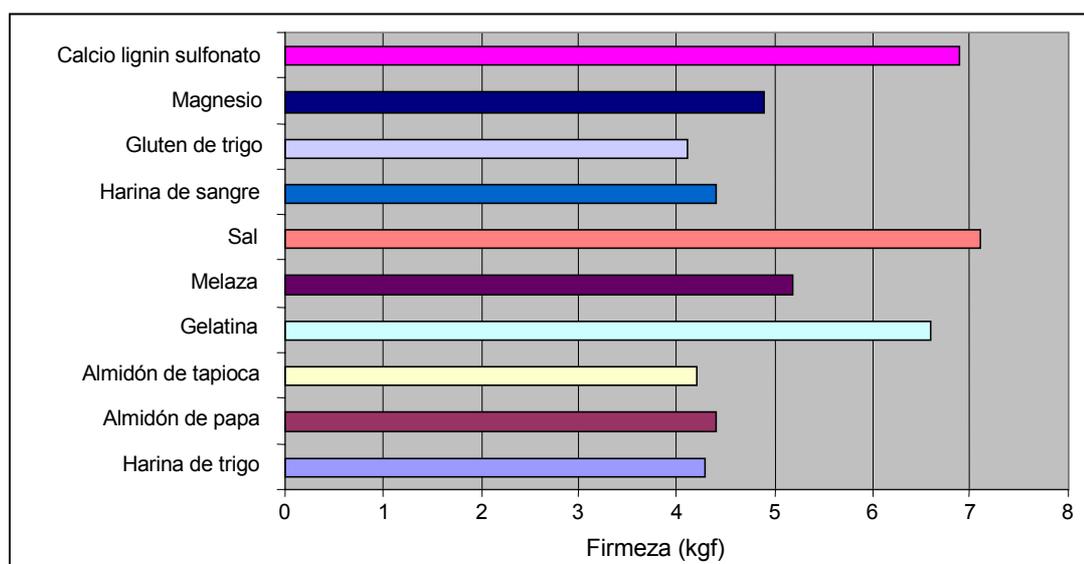


FIGURA 10. Comparación de la firmeza de alimento extruído con distinto aglutinantes.

FUENTE: SUNDERLAND (1996).

Para medir la durabilidad se ha usado, principalmente, la “caja giratoria” de Pfof y la prueba de durabilidad de Holmen. En el caso de la dureza, se han utilizados diversos equipos, destacándose la prensa de Kramer, el durómetro de

Kahl y en estudios más actuales la máquina de prueba universal INSTRON (THOMAS y VAN DER POEL, 1996).

Según WOOD (1987), existe una relación logarítmica entre la firmeza, determinada mediante el durómetro de Kahl, y la durabilidad, determinada mediante Holmen (FIGURA 11).

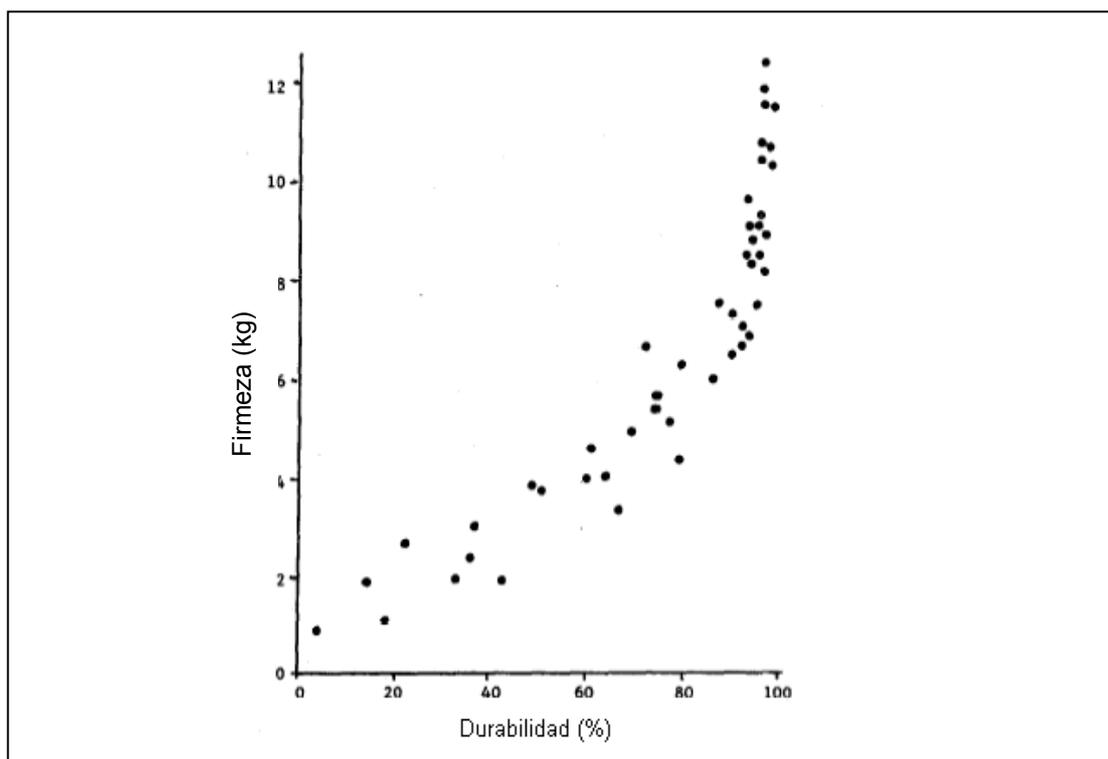


FIGURA 11. Relación entre la firmeza y la durabilidad.

FUENTE: WOOD (1997).

Los pellets con una alta durabilidad aseguran un flujo en silos de almacenaje, donde los finos producidos causan problemas tales como obstrucción. La formación de polvo representa pérdidas directas de alimento y también puede producir problemas relacionados con el medio ambiente (AARSETH, 2004).

Existen estudios que entregan todo el efecto de la calidad del pellet a la desnaturalización proteica, pero la mayoría de las industrias de alimentos está principalmente preocupadas por los efectos de la gelatinización del almidón y su rol en la durabilidad del pellet (BRIGGS, 1999).

2.3.2 Compresión de pellets. Estas pruebas proveen de un método objetivo para determinar las propiedades mecánicas de materiales biológicos y entregan información que puede ser usada para cuantificar y determinar las diferencias causadas por factores, entre otros, como la acción e interacción de ingredientes y los parámetros de proceso (MOHSENIN, 1986).

La prueba consiste en someter una muestra a compresión diametral, mediante la aplicación de una fuerza con desplazamiento constante (ASAE, 2004).

Esta metodología ha sido poco utilizada en los alimentos (pellet) para animales. Existen estudios como los de AARSETH y PRESTLOKKEN (2003), donde se utiliza la información obtenida por esta metodología para correlacionarlos con la resistencia al daño mecánico.

Para determinar las propiedades compresivas del pellet se requiere de una gráfica de fuerza deformación, del módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, del punto de biofluencia y de su ruptura (ASAE, 2004).

Según AARSETH y PRESTLOKKEN (2003), al comprimir el pellet, inicialmente, se produce un reordenamiento y una compactación de la superficie del pellet, luego presenta un comportamiento elástico donde se obtiene una relación lineal entre la fuerza y la deformación, posterior a esto se produce una zona de transición donde se produce la biofluencia del producto y por último una deformación plástica, que corresponde al esfuerzo sobre el cual la deformación relativa incrementa sin un incremento del esfuerzo, llegando hasta la ruptura.

Los estudios realizados por MOHSENIN (1986) en alimentos, no hablan de un reordenamiento y sólo identifica tres zonas: la elástica, plástica y la ruptura con o sin biofluencia (FIGURA 12). Esta última, se define como un incremento en la deformación con un mantenimiento o una disminución de la fuerza y se debe al rompimiento de las micro estructuras del alimento (MOHSENIN,1986).

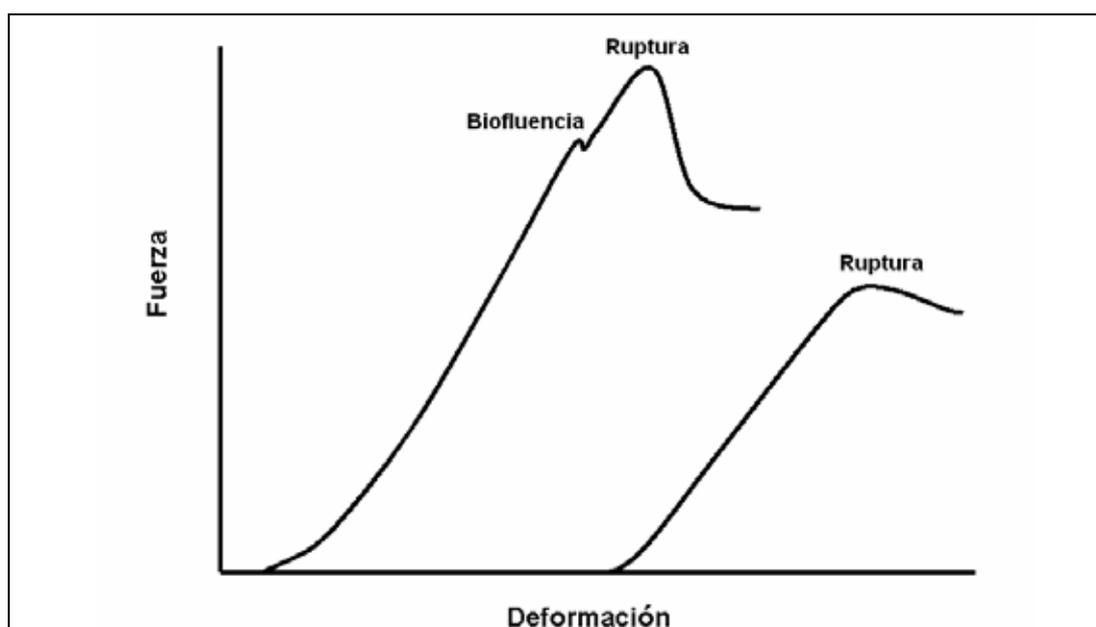


FIGURA 12. Curva de fuerza deformación para materiales biológicos con o sin punto de biofluencia.

FUENTE: MOHSENIN (1986)

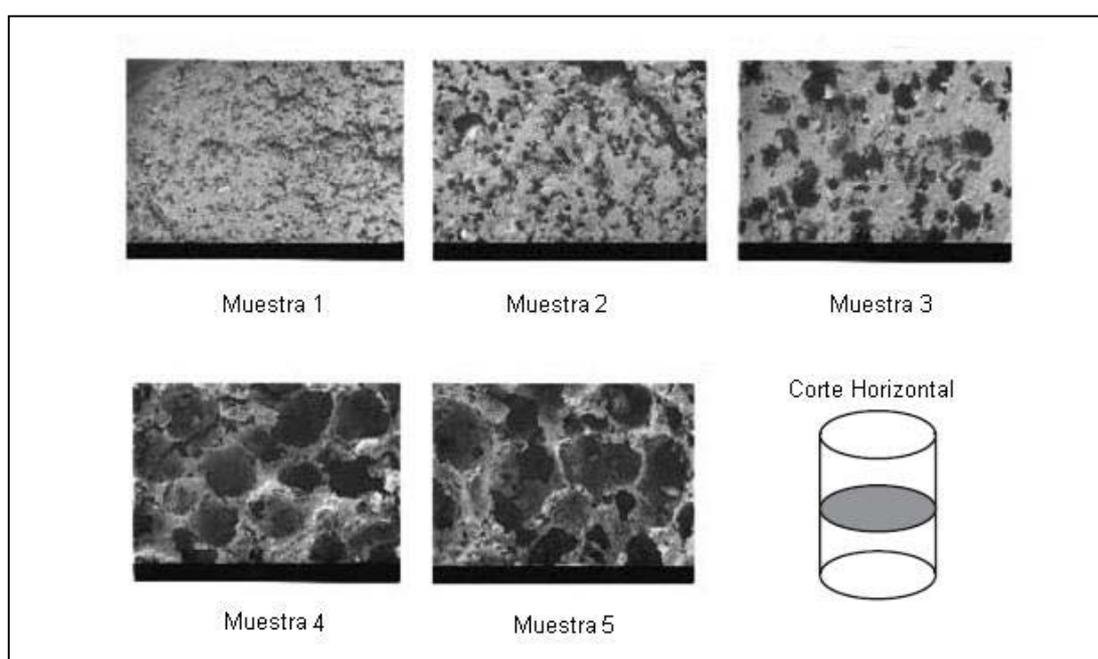
En algunos casos el punto de ruptura puede estar muy cercano al punto de biofluencia o se pueden mostrar un comportamiento de deformación plástica antes de la ruptura (AARSETH y PRESTLOKKEN, 2003).

Según MOHSENIN (1986), el módulo de elasticidad entrega información confiable sobre las características de firmeza de material comprimido.

Según MOORE et al. (1990), las propiedades texturales del extruído dependen de su estructura, es decir, de la organización, del tamaño y de la forma de sus

celdas. Los estudios de BARRETT y PELEG (1992) indican que la resistencia del extruído disminuye a medida que el tamaño de sus celdas internas aumenta produciendo un debilitamiento general de la estructura.

Los estudios de YOSHITOMI (2004) indican que las microestructuras del alimento cambian a medida que aumenta la temperatura y presión de extrusión situando la mayor resistencia del pellet, a la ruptura, en un punto de equilibrio entre su óptima gelatinización (temperatura de cocción), expansión (presión, viscosidad) y el tamaño de las celdas en el interior del pellet (FIGURA 13).



**FIGURA 13. Micrografías electrónicas de las estructuras internas de dietas experimentales.
Escala 1:30**

FUENTE: YOSHITOMI (2004)

3. MATERIAL Y METODO

3.1 Ingredientes

Para este estudio se utilizaron tres ingredientes que se les confieren propiedades aglutinantes debido a su contenido de almidón, éstos son: la harina de trigo, harina de avena descascarada y almidón de tapioca. En el CUADRO 4 se entrega un detalle de la composición química de los productos evaluados.

CUADRO 4. Composición de los ingredientes utilizados.

	Harina de trigo	Almidón de tapioca	Harina de avena decortificada
Proteína (%)	12,1	0,0	13,0
Humedad (%)	12,5	12,0	11,4
Lípidos (%)	1,7	0,0	8,1
Almidón (%)	64,5	88,0	51,4
Fibra (%)	0,2	0,0	2,4

FUENTE: CETECSAL S. A. (2005)

3.2 Diseño experimental

Para realizar una adecuada investigación de las propiedades funcionales de cada ingrediente, se utilizó un diseño de mezclas del tipo simplex-centroide (FIGURA 14), el cual tiene la ventaja de realizar combinaciones de cada ingrediente además de su evaluación independiente. Este diseño experimental se aplicó sólo a un 12% de la formulación total de la dieta, la porción restante (base) es idéntica para todas las dietas y está compuesta por materias primas de uso habitual en la fabricación de alimento para salmones (harina de pescado, harina de soya y harinillas), sumando un total de 100% para cada una de las dietas.

CUADRO 5. Fracción másica de cada ingrediente en el 12% de la formulación.

Formulación	Harina de Trigo	Almidón de Tapioca	Harina de avena decortificada
D - 1	1,0	0,0	0,0
D - 2	0,0	1,0	0,0
D - 3	0,0	0,0	1,0
D - 4	0,5	0,5	0,0
D - 5	0,5	0,0	0,5
D - 6	0,0	0,5	0,5
D - 7	0,3	0,3	0,3

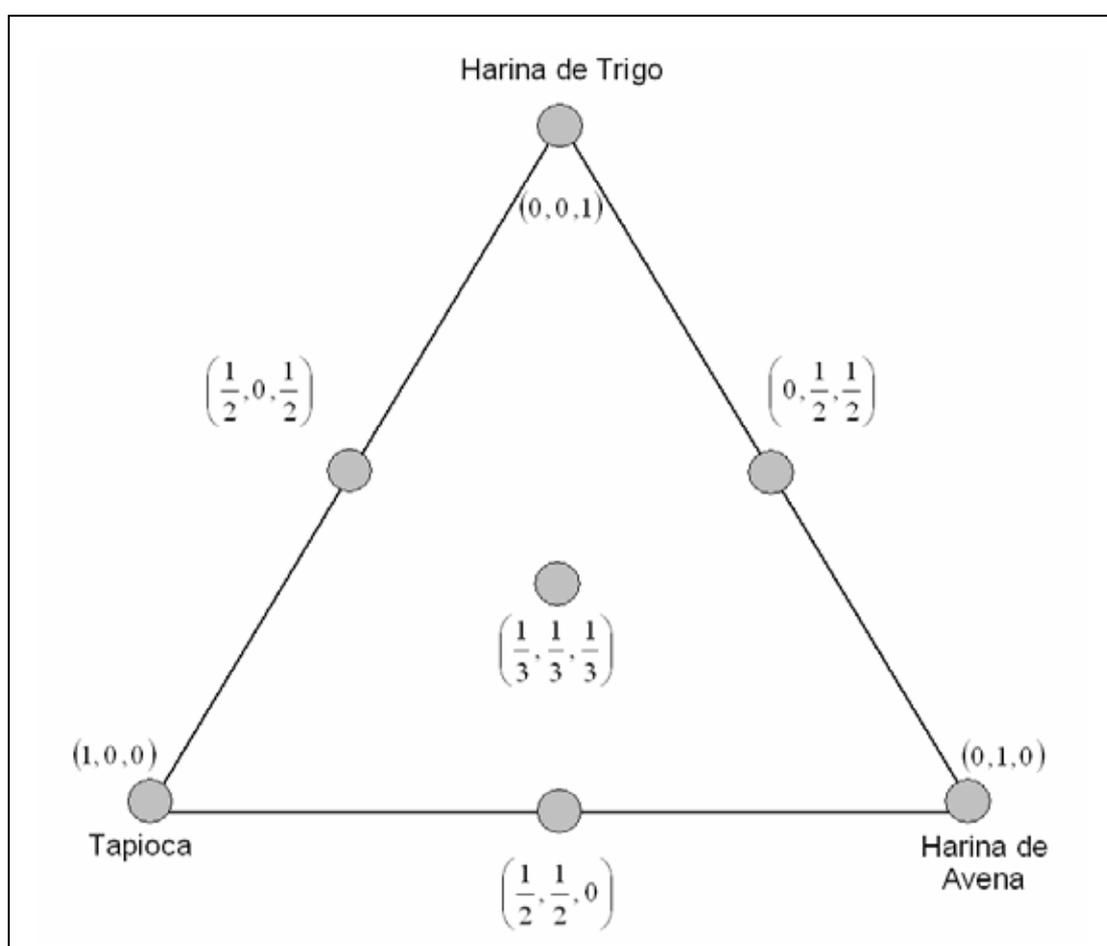


FIGURA 14. Descripción geométrica del diseño simplex-centroide.

Como se indica en el CUADRO 5, el diseño utilizado consta de 7 mezclas a evaluar, en este caso llamadas formulaciones.

3.3 Elaboración de dietas experimentales.

Las dietas fueron elaboradas en el laboratorio de extrusión del Centro de Estudios en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CECTA) de la Universidad de Santiago de Chile.

3.3.1 Mezcla de materias primas base. Se realizó una mezcla de todas las materias primas que conformaban la formulación base, previo pesaje de cada una de ellas, para este fin se utilizó un mezclador rotatorio.

3.3.2 Molienda. Se realizó una molienda de la mezcla antes descrita, para lo cual se utilizó un sistema de molienda fina marca Bühler que cuenta con un molino martillo modelo SUM.

3.3.3 Tamizado. Esta mezcla fue tamizada utilizando un tamizador rotatorio MPAR, se utilizó un tamiz de 1 mm como rechazo, es decir se utilizaron partículas inferiores a 1 mm.

3.3.4 Conformación de las dietas experimentales. Se pesaron las cantidades de cada ingrediente a evaluar y la cantidad de la mezcla base, luego se homogeneizaron en un mezclador rotatorio, obteniendo un batch de 8 kg para cada una de las 7 formulaciones. Se consideró 3 batch extra para la formulación D - 1 (harina panadera).

3.3.5 Extrusión. Las formulaciones fueron procesadas en un extrusor de doble tornillo marca Bühler Bi-ex DNDL 44/20D (FIGURA 15) utilizando una matriz de 7 mm y una configuración de tornillo usada comúnmente para la fabricación de alimentos acuáticos. Los parámetros de procesamiento se

determinaron utilizando la formulación D – 1 (12 % de harina de trigo más un 88% de la mezcla base), debido a que ésta es una formulación típica de la industria de alimento extruído para salmones y con información extrapolada de los extrusores industriales. Además, se utilizó un procedimiento usual en la industria, que consiste en llevar a régimen el extrusor mediante la aplicación excesiva de agua a la masa para luego reducir su inclusión lentamente hasta llegar a régimen y a una inclusión de un 20 a 25% de agua. Finalmente, y tras pequeños ajustes realizados basándose en la amplia experiencia del operador de la máquina, se obtuvo un pellet con características similares a la de un producto elaborado a nivel industrial. Estos parámetros se mantuvieron constantes para las demás dietas, las cuales fueron extruídas en orden aleatorio.

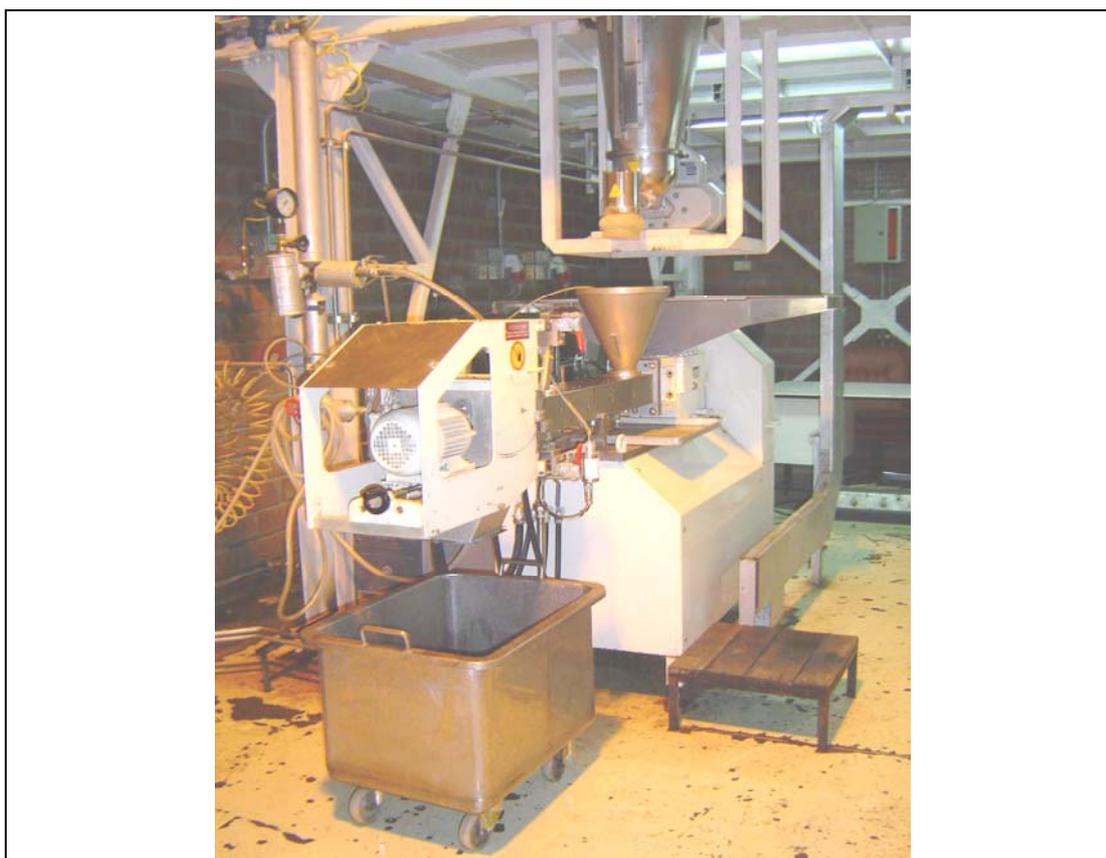


FIGURA 15. Extrusor Bühler de doble tornillo.

3.3.6 Toma de muestras. Las formulaciones fueron extruídas de forma semicontinua dejando vaciar completamente la tolva de alimentación (polvos) del extrusor entre cada batch. Se tomó una muestra de aproximadamente 3 kg de alimento extruído por cada formulación, para lo cual se dejo estabilizar el proceso (régimen) teniendo como parámetro de control la estabilización de la temperatura en la salida del tornillo y la presión del extrusor.

3.3.7 Secado. Se realizó un secado del alimento extruído hasta llegar a una humedad cercana al 8 %, utilizando un secador de bandeja vertical marca Homberger. La humedad fue controlada mediante termobalanza.

3.3.8 Zarandeado. Se tamizó cada una de las dietas por un periodo de 30 segundos utilizando una malla de 3 mm, con el fin de eliminar los finos generados en el secado y se cuantificó la cantidad obtenida para cada una de las formulaciones.

3.4 Análisis físico-químico

Los análisis aplicados a las dietas manufacturadas fueron realizados en el Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL) de la Universidad Austral de Chile, en el Centro Tecnológico del Salmón (CETECSAL) y en laboratorio químico del CECTA perteneciente a la Universidad de Santiago de Chile.

Los parámetros evaluados fueron: absorción de aceite, grado de gelatinización del almidón, expansión axial y radial de los pellets, densidad, durabilidad y elasticidad de los pellets, además se realizo un perfil amilográfico a las materias primas evaluadas, todo con el fin de caracterizar al máximo los productos obtenidos.

3.4.1 Absorción de aceite. Las dietas fueron aceitadas mediante la utilización de un aceitador al vacío de laboratorio que consta de un recipiente de cierre hermético y de una bomba manual (FIGURA 16). Se utilizó aceite de pescado calentado en microondas a una temperatura de 50 °C y se produjo una presión negativa cercana a los 200 mbar para cada formulación (FIGURA 17). Una vez obtenido el vacío, se agitó vigorosamente el alimento junto al aceite por 30 s y luego se liberó lentamente la presión de la bomba. La cantidad de aceite adicionada fue en exceso por lo cual se dejó escurrir el alimento por un periodo de 24 horas. El procedimiento se repitió 3 veces por cada formulación.



FIGURA 16. Aceitador de laboratorio con sistema de vacío

Para el cálculo de la cantidad de absorción, se determinaron los lípidos totales del alimento sin aceitar y post aceitado al vacío. Se utilizó la extracción por fluido supercrítico mediante la utilización de un equipo LECO® TFE 2000 y se cuantificaron los lípidos totales gravimétricamente. Se restó el contenido inicial al contenido final de lípidos para así obtener la absorción de aceite neta.



FIGURA 17. Detalle del aceitado al vacío con alimento y aceite

3.4.2 Determinación del porcentaje de gelatinización de almidón. Se determinó el grado de cocción de los almidones contenidos en cada dieta. Este análisis se realizó mediante una hidrólisis enzimática utilizando glucoamilasa.

3.4.3 Amilogramas. Se realizó un amilograma para las materias primas en evaluación, utilizando el equipo Promilógrafo T2VQ (Max Egger, Austria). Este equipo registra la viscosidad (unidades Brabender) en función del tiempo y temperatura. Se utiliza 20 g de muestra y 110 ml de agua para cada análisis. La muestra se calentó gradualmente hasta los 95 °C en un tiempo no superior a los 40 minutos.

3.4.4 Determinación de la expansión radial y axial. Se realizaron mediciones de diámetros y largos de 50 pellets para cada una de las dietas experimentales utilizando un pie de metro.

3.4.5 Determinación de la densidad. Mediante una adaptación del procedimiento de laboratorio de WENGER INC (HERTZEL *et al.*, 2000), se determinó la densidad real del alimento. Se utilizó una bureta con agua y diez pellet por cada una de las formulaciones. Los pellets fueron pesados en una balanza de precisión e introducidos en la bureta, rápidamente se registró el desplazamiento del volumen de agua. El peso (g) de los pellets fueron divididos por el volumen (ml) desplazado. La medición se realizó en triplicado.

3.4.6 Prueba de durabilidad. Mediante la utilización del equipo DORIS (durability on a realistic test) feed tester (Akvasmart®) se realizaron mediciones de durabilidad de los pellets al estrés mecánico. Este equipo tiene una alta correlación con las condiciones de estrés a las que está sometido el alimento para peces (FIGURA 18).



FIGURA 18. Equipo de medición de durabilidad Akvasmart.

El equipo DORIS está equipado con un tornillo de Arquímedes y con una paleta rotatoria. Las siete formulaciones se evaluaron en triplicado y en cada prueba se utilizaron 350 g de alimento. Durante ésta, tanto las revoluciones del tornillo como las de la paleta rotatoria, se mantuvieron constantes. Posterior al paso por esta máquina, las formulaciones fueron tamizadas, separando los finos (partículas < 2,36 mm) y partidos (partículas desde 6,70 mm hasta 2,36 mm) del alimento normal. Los materiales finos y partidos fueron pesados en una balanza de precisión. La durabilidad se expresó en porcentaje de finos y partidos con respecto a la cantidad total de muestra sometida al estrés mecánico.

3.4.7 Pruebas de compresión. Se basó en la norma ASAE (American Society of Agricultural Engineers) S368.4 DEC2000, la cual normaliza las condiciones de pruebas de compresión de materiales alimenticios con forma convexa, se realizaron mediciones utilizando el equipo INSTRON modelo 1011, con la siguiente configuración:

- Test : Compresión
- Unidades: Sistema internacional (SI)
- Transductor de carga: 50 kg o 500 N
- Dispositivo de compresión: cilindro sólido de acero de 13 mm de diámetro
- Velocidad de desplazamiento del cabezal móvil: 10 mm/min
- Rango de carga de operación: 40%, es decir 20 kg
- Ruptura: 10%

Se realizaron 25 mediciones para cada una de las 7 dietas. Cada medición fue realizada tomando un pellet al azar el cual se situó en el plato de compresión en forma horizontal, es decir fue comprimido diametralmente. Durante cada medición, se registró la fuerza de compresión en función de la deformación (*track*) capturada mediante la utilización de una webcam, luego se guardó un archivo con la grabación obtenida en cada una de las mediciones. Mediante la

revisión de las filmaciones en cámara lenta, utilizando el programa Micro DVD Player 1.2, se obtuvo la información de fuerza y desplazamiento. Posterior a esto, se realizaron las gráficas para cada una de las 7 dietas. Utilizando la función *peak 1* del equipo INSTRON se recuperó la fuerza y la deformación máxima para cada prueba de compresión.

El esfuerzo máximo de los pellets fueron calculados mediante la ecuación indicada por LI *et al.*, (2000) para la compresión de especímenes de forma cilíndrica:

$$\sigma = \frac{F}{\pi r L} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

σ : Esfuerzo máximo, N/cm²

F : Fuerza de ruptura, N

r : Radio del pellet, cm

L : Largo del pellet, cm

El módulo de elasticidad se calculó mediante la ecuación 2:

$$E = \frac{\sigma f}{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad, Pa

σ : Esfuerzo máximo, N/cm²

ΔD : Cambio en el diámetro del pellet, cm

D : Diámetro original del pellet, cm

f : Factor de transformación de cm² a m², igual a 10.000

3.5 Análisis estadístico.

Se utilizó el software estadístico Statgraphics 5.1 para realizar la evaluación de los resultados obtenidos. Se utilizaron los siguientes análisis:

- Pruebas de parametricidad de los datos obtenidos
- Transformación angular de Bliss
- Análisis de varianza de una vía
- Prueba de comparación múltiple de Tukey (HSD) post hoc
- Prueba de correlación
- Análisis de diseño de mezclas simplex-centroide

4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Fabricación de dietas experimentales

La elaboración de las dietas experimentales se realizó en el Laboratorio de Extrusión del CECTA de la Universidad de Santiago de Chile. Se trabajó con una fórmula comercial de mínimo costo y se experimentó, solamente, con un 12 % de esta formulación; fracción destinada, usualmente, a la incorporación de harina de trigo con el fin de entregar propiedades físicas al los pellets. El 88% restante de la formulación se mantuvo constante.

4.1.1 Determinación de los parámetros experimentales del proceso de extrusión. Mediante la extrapolación de parámetros del proceso usados a gran escala y junto a pequeños ajustes realizados durante la prueba, basados en la experticia del operador e información obtenida en pruebas anteriores, se determinó que las condiciones de proceso adecuadas para producir un pellet con características similares a los elaborados de forma industrial, son los informados en el CUADRO 6. Estos parámetros, se mantuvieron constantes para la fabricación de todas las dietas.

Cuadro 6. Parámetros experimentales de extrusión.

Matriz	7 mm
Alimentación de Materia Prima	45 kg/h
Alimentación de Agua	11 kg/h
Velocidad de Tornillo	500 rpm
Velocidad de Cuchillas Cortador	125 rpm
Temperatura de Calefacción de Barriles	85 °C

Cabe destacar que aunque estos parámetros se mantuvieron constantes durante la elaboración de las siete dietas, se registraron fluctuaciones en variables de proceso que son dependientes (presión, torque y temperatura de salida), en este caso, de los ingredientes en evaluación; estas variaciones se indican en el CUADRO 7. Además, en este cuadro se presentan los resultados obtenidos en los análisis realizados a los pellets de cada formulación experimental.

Las condiciones de proceso aplicadas a las formulaciones lograron una gelatinización de los almidones superior al 95 % (CUADRO 7) por lo cual se considera que los almidones, de los ingredientes en prueba, están presentando sus propiedades funcionales.

4.1.2 Zarandeado. Se obtuvieron resultados numéricamente diferentes, indicando claramente que la incorporación de tapioca en la formulación entrega un alimento que al ser zarandeado genera una menor cantidad de fino (partículas de alimento < 2,36 mm) y que la dieta con harina de avena tiene una mayor generación. Esta información, en la industria de alimento para peces, es de gran importancia ya que todo el fino generado dentro de la planta pasa a formar parte del reproceso; materia prima de menor calidad y de alto costo energético.

Al representar la generación de fino en el diseño de mezclas, se obtiene un modelo que explica el efecto causado por los ingredientes en prueba. En este caso, la generación de fino (o material particulado) corresponde a un modelo lineal con un R^2 ajustado de 75% (FIGURA 19). La ecuación 3, explica la generación de fino como resultado de la inclusión de almidón de tapioca, harina de trigo y avena o de sus mezclas en la formulación de alimento extruído. Se recuerda que los contenidos de estos ingredientes están expresados como fracción másica y corresponden al 12% de la formulación total.

CUADRO 7. Resumen de resultados experimentales según formulación.

Parámetros	D – 1	D – 2	D – 3	D – 4	D – 5	D – 6	D – 7
Ingredientes	Harina de trigo	Almidón de Tapioca	Harina de Avena	H. de Trigo A. de Tapioca	H. de Trigo H. de Avena	A. de Tapioca H. de Avena	H. Trigo A. de Tapioca H. de Avena
Contenido de almidón (%)	9,5	13,1	7,5	11,2	8,5	10,5	10,1
Gelatinización del almidón (%)	96,8	97,8	95,3	97,5	97,2	95,9	96,5
T salida (°C)	89	89	90	90	92	91	90
Presión (bar)	29	25	25	33	33	36	36
Torque (Nm)	80	86	97	97	97	92	92
SME (kWh/kg)	93	100	112	112	112	108	108
Tiempo secado (h)	8	13	4	11	5	8	7
Fino zarandeo (%)	1,18	0,59	2,29	0,73	1,79	0,71	1,18
Diámetro (cm)	0,68 +/- 0,02	0,72 +/- 0,02	0,69 +/- 0,03	0,71 +/- 0,02	0,69 +/- 0,03	0,72 +/- 0,03	0,7 +/- 0,02
Largo (cm)	1,05 +/- 0,06	1,16 +/- 0,06	1,34 +/- 0,07	1,23 +/- 0,06	1,28 +/- 0,06	1,2 +/- 0,06	1,26 +/- 0,07
Densidad (g/ml)	1,18 +/- 0,01	1,18 +/- 0,01	1,09 +/- 0,02	1,18 +/- 0,01	1,13 +/- 0,01	1,14 +/- 0,01	1,15 +/- 0,01
Absorción de aceite (%)	10,7 +/- 0,2	8,64 +/- 0,2	13,62 +/- 0,19	9,31 +/- 0,19	11,56 +/- 0,19	10,52 +/- 0,19	9,38 +/- 0,2
Durabilidad (%)	0,34 +/- 0,03	0,32 +/- 0,03	1,18 +/- 0,04	0,58 +/- 0,03	0,66 +/- 0,04	0,63 +/- 0,04	0,48 +/- 0,04
Fuerza (N)	120,8 +/- 10	138,8 +/- 10	74,8 +/- 9,5	126,1 +/- 9,5	87,3 +/- 9,9	71,8 +/- 9,8	128,2 +/- 11,5
Deformación (mm)	0,95 +/- 0,14	0,98 +/- 0,14	0,67 +/- 0,16	0,81 +/- 0,14	0,51 +/- 0,14	0,69 +/- 0,14	0,91 +/- 0,14
Módulo de elasticidad (MPa)	7,96 +/- 1,41	7,91 +/- 1,41	5,49 +/- 1,32	8,24 +/- 1,35	9,12 +/- 1,37	5,67 +/- 1,26	7,29 +/- 1,4

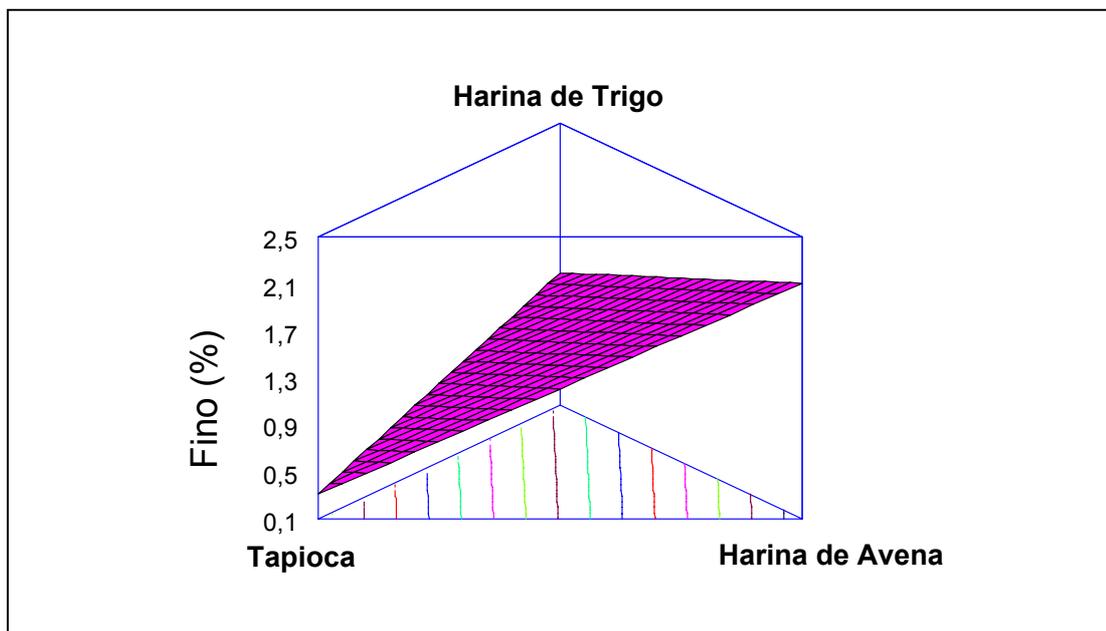


FIGURA 19. Superficie respuesta para la generación de fino.

$$F = 1,2 w_{Tr} + 0,3 w_{Ta} + 2,1 w_{Av} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

- F : Fino, % p/p
- w_{Tr} : Fracción másica de harina de trigo
- w_{Ta} : Fracción másica de almidón de tapioca
- w_{Av} : Fracción másica de harina de avena

Para minimizar la generación de fino es necesario utilizar solamente almidón de tapioca en la formulación o al contrario utilizar una baja proporción de avena.

Las diferencias registradas en la generación de fino se deben principalmente a la forma de la estructura superficial de los pellets. En el caso de las formulaciones que contienen harina de avena, estas presentaron imperfección severas en la superficie de los pellets (rugosidades), lo cual los hace altamente susceptibles a la fricción provocada, como lo indica THOMAS y VAN DER POEL (1996), por la acción de fuerzas estáticas y dinámicas. Además, se debe

considerar que los pellets elaborados con avena tienen una mayor superficie de contacto. Las formulaciones que contienen harina de trigo y almidón de tapioca, presentaron pellets de superficie lisa generando una baja fricción entre ellos. Las características de la superficie del pellet sería producto de las variaciones que se producen en la viscosidad de la pasta dentro del extrusor, la cual es dependiente del contenido y del tipo de almidón (GUY, 2001).

4.2 Análisis físico-químico.

Se caracterizaron los pellets, de todas las formulaciones experimentales, física y químicamente, con el fin de conocer las propiedades entregadas por las distintas fuentes de almidón y sus mezclas. Estas pruebas se realizaron en los laboratorios de CETECSAL y en el ICYTAL de la Universidad Austral.

4.2.1 Absorción de aceite. Las formulaciones presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la absorción de aceite, siendo ésta mayor en las mezclas que contienen harina de avena y menor en las que contienen almidón de tapioca. La absorción fue máxima cuando se utilizó harina de avena y mínima al utilizar almidón de tapioca. La harina de trigo mostró una absorción intermedia. Las formulaciones compuestas por más de un ingrediente en prueba, siguieron las tendencias de sus ingredientes puros.

El diseño de mezclas explicó la absorción de aceite mediante un modelo lineal el cual tiene un R^2 ajustado de 82,4%. El análisis de varianza del diseño de mezclas muestra una relación estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre la absorción de aceite y los ingredientes. En las FIGURAS 20 y 21 se muestra claramente que el ingrediente de mayor efecto en la absorción es la harina de avena, también se evidencia al revisar los factores por los cuales son multiplicados los ingredientes en la ecuación 4.

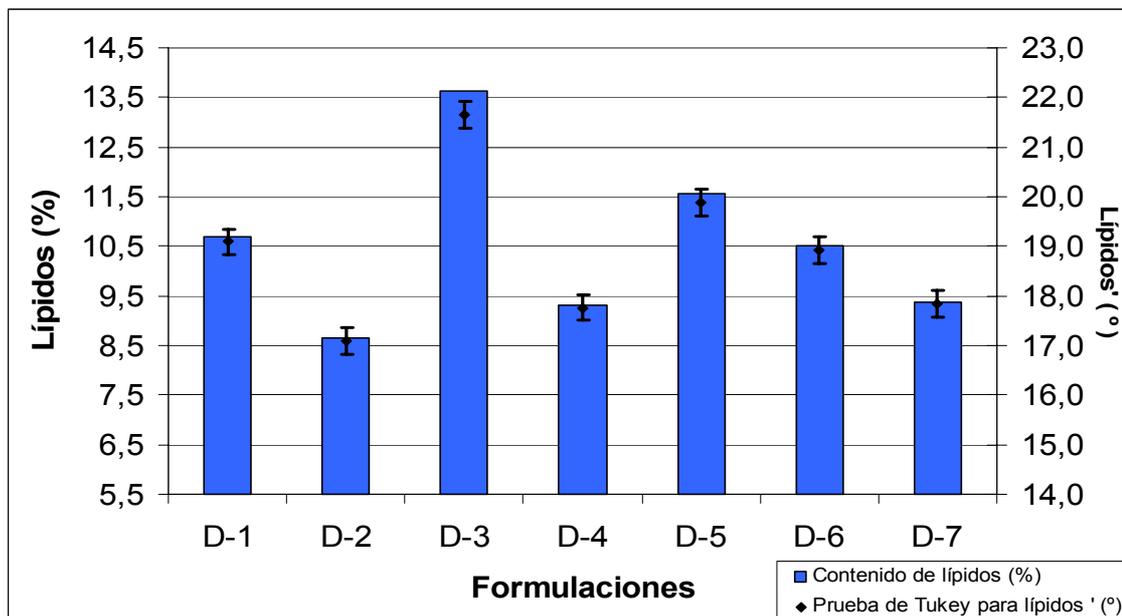


FIGURA 20. Absorción de aceite y comparación estadística de medias.

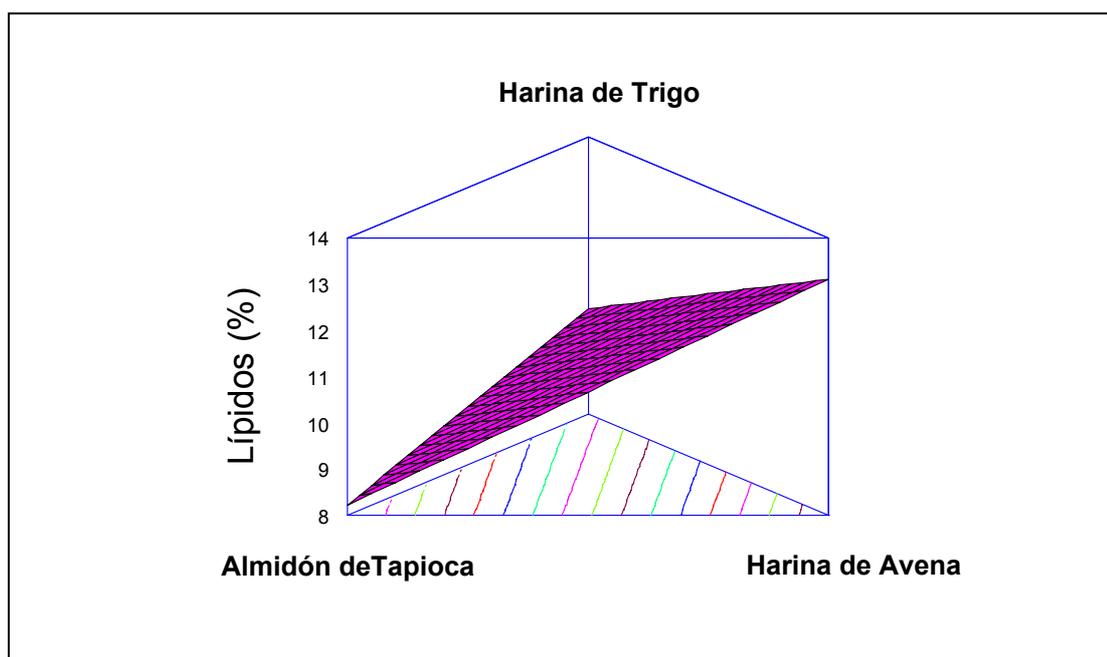


FIGURA 21. Superficie respuesta para la absorción de aceite.

La ecuación 4 explica la absorción de aceite mediante un modelo lineal, donde la fracción másica de ingredientes corresponden al 12 % de la formulación total.

$$Aa = 10,3w_{Tr} + 8,3w_{Ta} + 13,1w_{Av} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- Aa : Absorción de aceite,% p/p
- w_{Tr} : Fracción másica de harina de trigo
- w_{Ta} : Fracción másica de almidón de tapioca
- w_{Av} : Fracción másica de harina de avena

Las causas de las diferentes absorciones de aceite se explican mediante el distinto contenido de almidones y probablemente a su tipo, ya que según lo informado por GUY (2001) el menor contenido de almidón en la harina de avena produce una masa de menor viscosidad, la cual deja fluir fácilmente las burbujas de vapor de agua a través de sí, generando un producto con mayor porosidad y con un menor contenido de agua. Las formulaciones con un alto contenido de tapioca presentaron una menor absorción de aceite debido a que, según MUNZ (2004) y GUY (2001), la alta viscosidad de la masa no dejó liberar las burbujas de agua presentes en la pasta, generando una baja porosidad y un alto contenido de humedad, resultados que se contraponen a lo informado por SUNDERLAND (1996). Es probable que esta formulación (D-2) requiera de una menor adición de agua en el proceso o de una mayor caída de presión a la salida del extrusor.

Las diferencias en el contenido de humedad entre, las formulaciones, se detectaron en el control de secado. Las formulaciones con un alto contenido de harina de avena presentaron un bajo contenido de humedad y requirieron un menor tiempo de secado y al contrario las formulaciones con un alto contenido de tapioca requirieron un mayor tiempo de secado (CUADRO 7). Esta información, es de gran importancia industrial ya que una mayor retención de

agua en el extruído afecta de forma importante al proceso de secado, produciendo un incremento en los costos energético y disminuyendo la capacidad productiva, además produce un aumento en las pérdidas de nutrientes termolábiles. Por otra parte, la ineficiencia del proceso de secado, puede afectar la vida útil del producto aumentando la susceptibilidad del alimento al desarrollo de microorganismos, hongos principalmente, y también puede generar condiciones favorables para la ocurrencia de procesos de descomposición del alimento.

4.2.2 Expansión. Se presentaron diferencias significativas en la expansión diametral y axial, ambos parámetros fueron evaluados de forma independiente. Estos parámetros son indicadores de calidad que se relacionan con la densidad del pellet (flotación), absorción de aceite y con la talla del salmón a alimentar (tamaño de la boca, energía de la ración)

4.2.2.1 Expansión diametral. Las formulaciones presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la expansión diametral. Las formulaciones con almidón de tapioca obtuvieron una mayor expansión (formulación pura y con harina de avena) y no se evidenció una diferencia estadística entre las dietas que contienen harina de trigo y harina de avena (excluyendo la mezcla con tapioca). En la FIGURA 22 se muestra la comparación estadística.

Las diferencias registradas en la expansión diametral se deben al mayor contenido y tipo de almidón (CUADRO 7) que poseen las formulaciones constituidas con tapioca, lo cual produce una pasta más elástica. Esta pasta retiene más vapor y debido a la fuerza de este último por salir del pellet, producto de la caída de presión a la salida del extrusor, logra producir una mayor expansión. Este proceso, según ALVAREZ-MARTINEZ *et al.* (1988)

podría ser potenciado por el mayor contenido de amilopectina de este ingrediente (CUADRO 2).

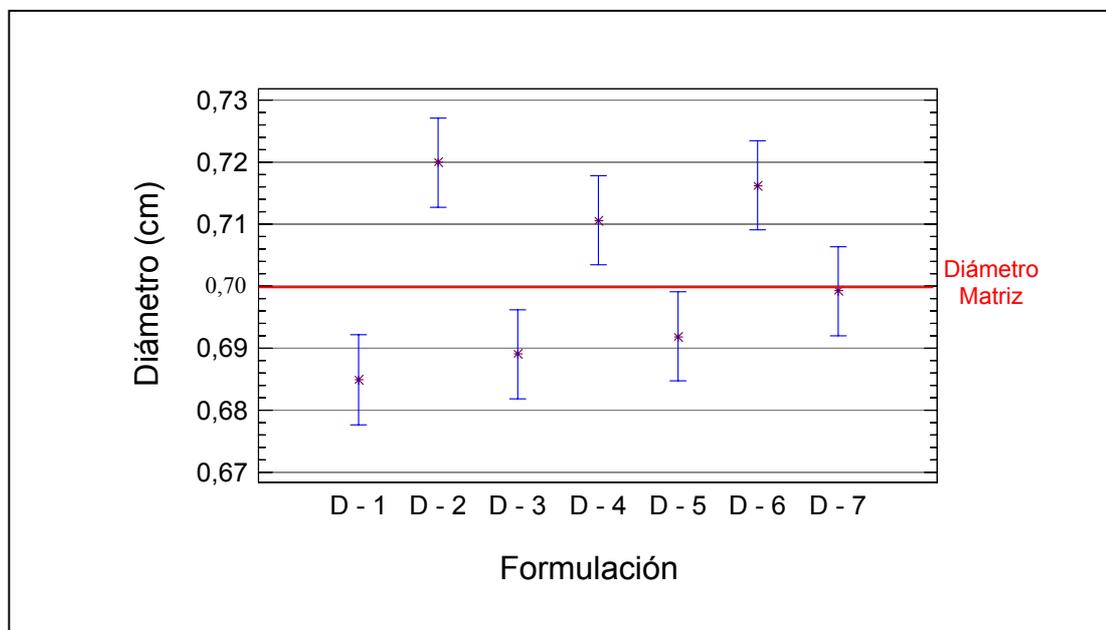


FIGURA 22. Comparación múltiple del diámetro para cada formulación.

Cabe destacar que la elasticidad de la pasta es también responsable de la contracción del pellet al enfriarse, factor de importancia en formulaciones con un menor contenido de almidón como lo son las que contienen harina de avena y trigo, también afectaría la proporción de amilosa o la reducción de las moléculas del almidón, principalmente amilopectina, por el efecto de los procesos mecánicos de la extrusión (GUY, 2001).

El mayor contenido de lípidos, que presenta la harina de avena, puede ser un factor que incida en la menor expansión de los pellets (RIAZ, 1997), debido a que los lípidos producen un efecto lubricante en el proceso de extrusión disminuyendo el trabajo mecánico y el tiempo de retención.

El diseño de mezclas explica la expansión diametral mediante un modelo lineal el cual tiene un R^2 ajustado de 80,6%. El análisis de varianza del diseño de mezclas muestra una relación estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre la expansión diametral y los ingredientes evaluados. En la FIGURA 23 se muestra claramente que el ingrediente de mayor efecto en esta variable respuesta es el almidón de tapioca.

La ecuación 5 explica el diámetro del pellet en función de la fracción másica de los ingredientes utilizados en el 12% de la formulación experimental:

$$D = 0,68 w_{Tr} + 0,73 w_{Ta} + 0,70 w_{Av} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- D : Diámetro, mm
- w_{Tr} : Fracción másica de harina de trigo
- w_{Ta} : Fracción másica de almidón de tapioca
- w_{Av} : Fracción másica de harina de avena

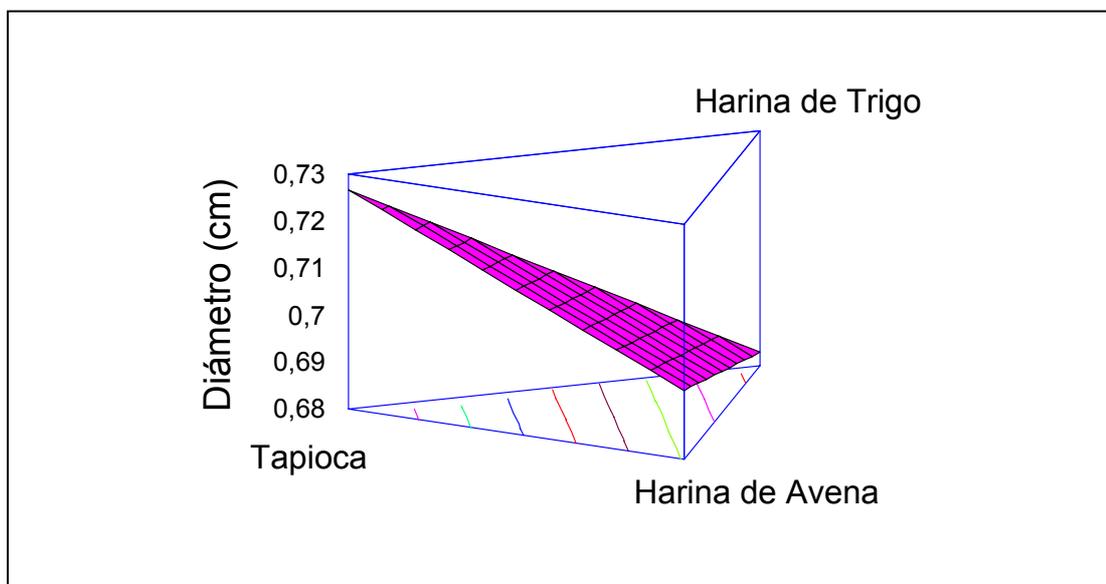


FIGURA 23. Superficie respuesta del diámetro del pellet.

Aunque existe diferencia estadística entre los diámetros, esta diferencia no tiene un gran impacto productivo, ya que al utilizar una matriz de 7 mm sólo se obtuvieron variaciones de un $\pm 3\%$. Esta variación es considerada normal para las plantas de alimento.

4.2.2.2 Expansión axial. Al comparar estadísticamente las expansiones axiales, o también llamado “largo del pellet”, se evidenció una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre las formulaciones. La formulación que contenía harina de avena pura presento una mayor expansión axial y a la inversa la formulación que contenía harina de trigo presento una expansión significativamente menor con respecto a las demás formulaciones (FIGURA 24).

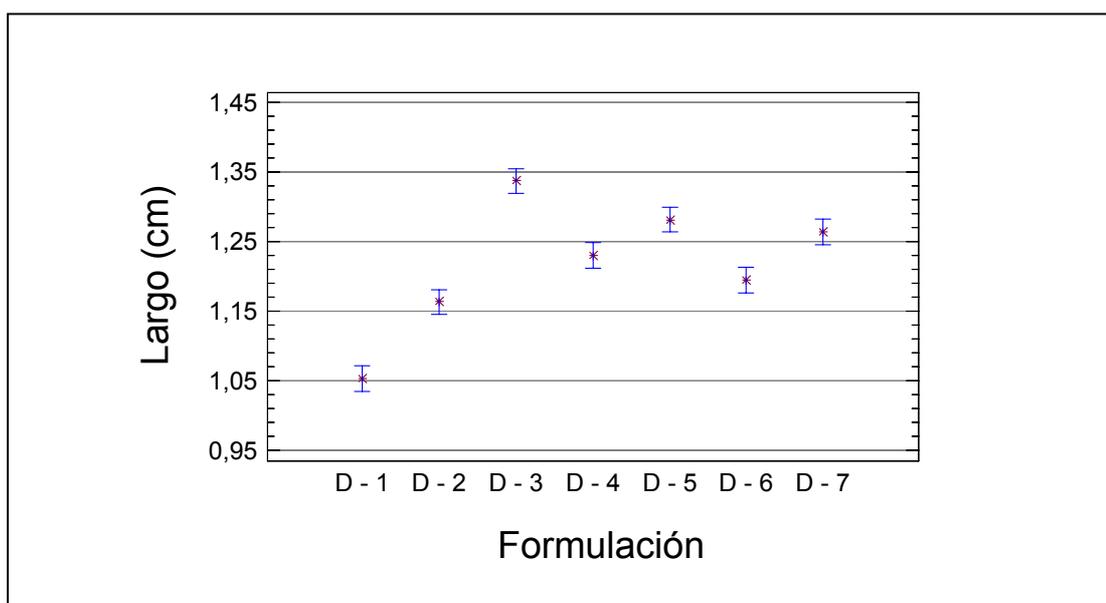


FIGURA 24. Comparación múltiple del largo del pellet según formulación.

La expansión axial, evaluada en el diseño de mezclas, es explicada por un modelo cuadrático con un R^2 ajustado de 99,8%. Además, existe una relación significativa ($p < 0,05$) entre esta variable y los ingredientes utilizados (FIGURA 25).

La ecuación 6 explica el comportamiento de la expansión axial en función de la fracción de ingredientes del 12 % de la formulación total:

$$L = 0,68w_{Tr} + 0,72w_{Ta} + 0,69w_{Av} + (0,03w_{Tr}w_{Ta}) + (0,01w_{Tr}w_{Av}) + (0,05w_{Ta}w_{Av})$$

Ec. 6

Donde:

- L : Largo, mm
- w_{Tr} : Fracción másica de harina de trigo
- w_{Ta} : Fracción másica de almidón de tapioca
- w_{Av} : Fracción másica de harina de avena

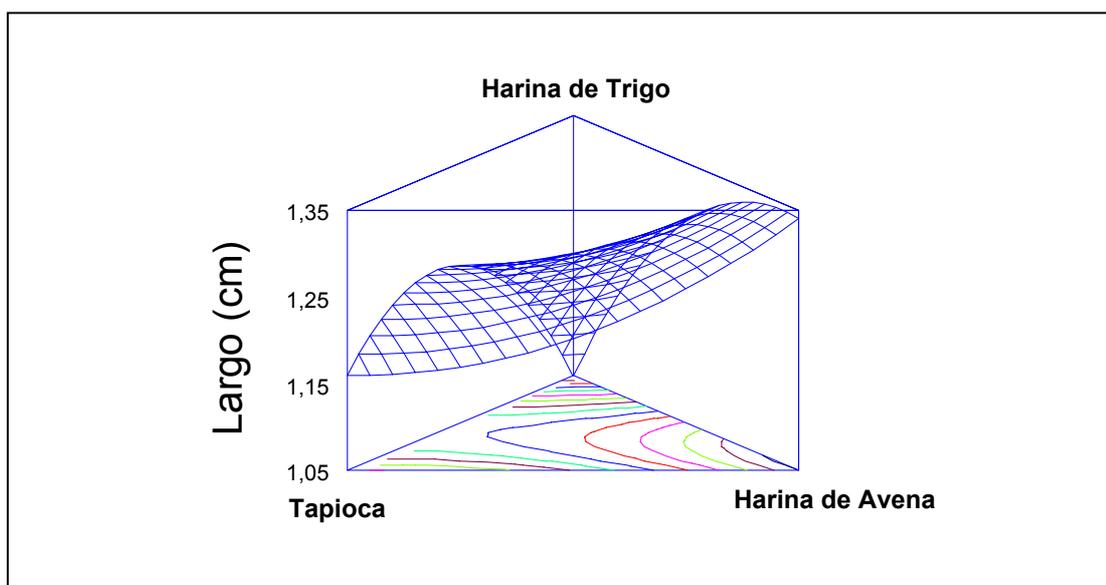


FIGURA 25. Superficie respuesta del largo del pellet.

Los principales ingredientes causantes de la diferenciación en la expansión axial es la harina de avena, la cual entrega una menor viscosidad a la pasta debido a su menor contenido de almidón y mayor contenido de lípidos, permitiendo un flujo más rápido a la salida del extrusor (ROKEY y PLATTNER, 2004; RIAZ, 1997), y la harina de trigo que a diferencia de los otros ingredientes

contiene gluten, el cual interfiere en la expansión (FAUBION y HOSENEY, 1982a y 1982b).

4.2.2.3 Relación entre la expansión radial y la axial. Según ALVAREZ-MARTINEZ *et al.*, (1998) existe una relación inversa entre estas dos variables. En este estudio, la evaluación entre estas dos variables no entregó una correlación significativa (FIGURA 26), pero al retirar de este análisis a la formulación D - 1 que contiene harina de trigo, y realizar nuevamente el análisis (FIGURA 27), éste entregó una correlación estadísticamente significativa ($p < 0,05$).

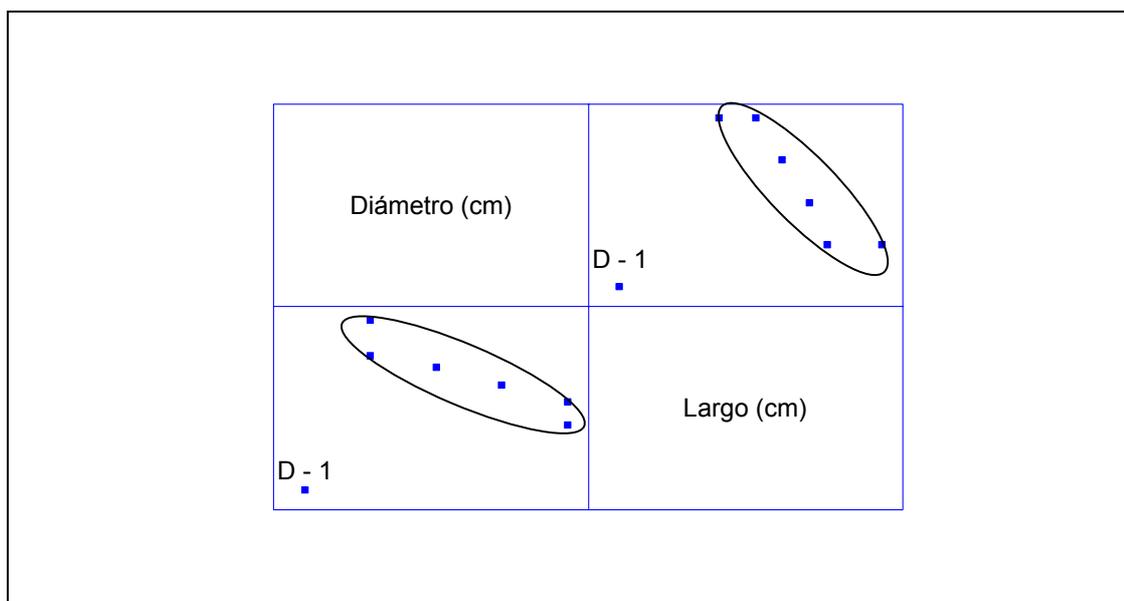


FIGURA 26. Correlación entre diámetro y largo del pellet.

La FIGURA 27 muestra que al retirar del análisis a la formulación D - 1 se cumple la relación inversa que existe entre la expansión del diámetro y el largo del extruído, además se demuestra claramente que la formulación D - 1 tiene un comportamiento atípico en la expansión debido, según FAUBION y HOSENEY (1982a y 1982b), a su contenido de gluten. Este efecto es menos drástico en las

formulaciones en que la harina de trigo es mezclada y diluida con los otros ingredientes.

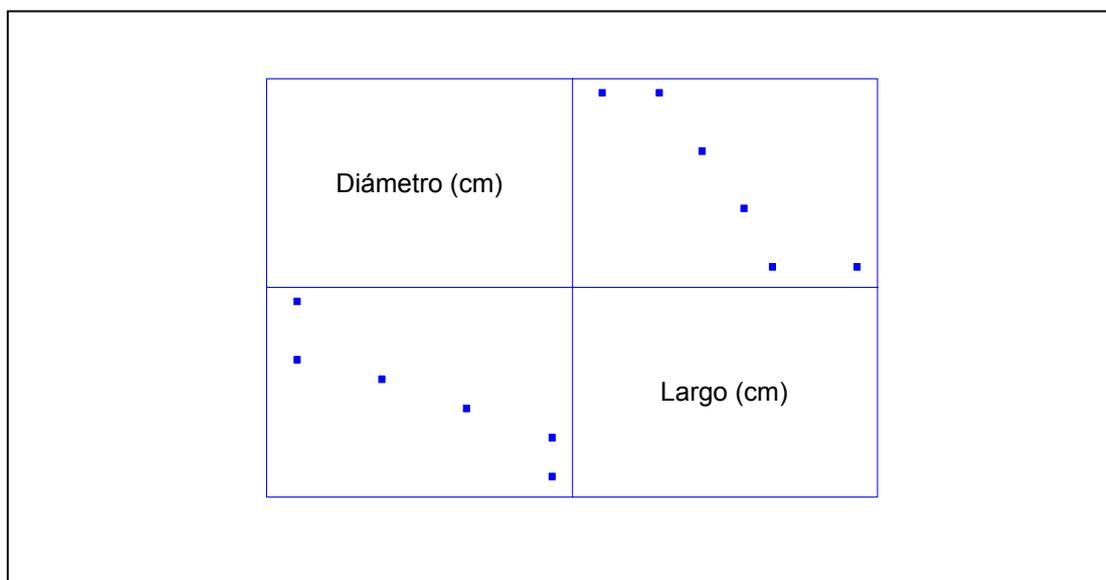


FIGURA 27. Correlación entre diámetro y largo corregido.

4.2.3 Durabilidad. La producción de finos y partidos, producto del estrés mecánico aplicado por el Feed Tester DORIS, presentó diferencia estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las distintas formulaciones. En la FIGURA 28 se muestra las diferencias estadísticas destacándose claramente la baja durabilidad de los pellets formulados con harina de avena (D - 3) y la alta durabilidad de los pellets formulados con harina de trigo (D - 1) y almidón de tapioca (D - 2), además, se muestra la durabilidad intermedia de los pellets formulados con las mezclas de los ingredientes antes nombrados.

La producción de finos y partidos del alimento, evaluada en el diseño de mezclas, se explica con un modelo lineal con R^2 ajustado de 74,4 %. El análisis de varianza del diseño de mezclas muestra una relación estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre la producción de finos y partidos y los ingredientes evaluados (FIGURA 29).

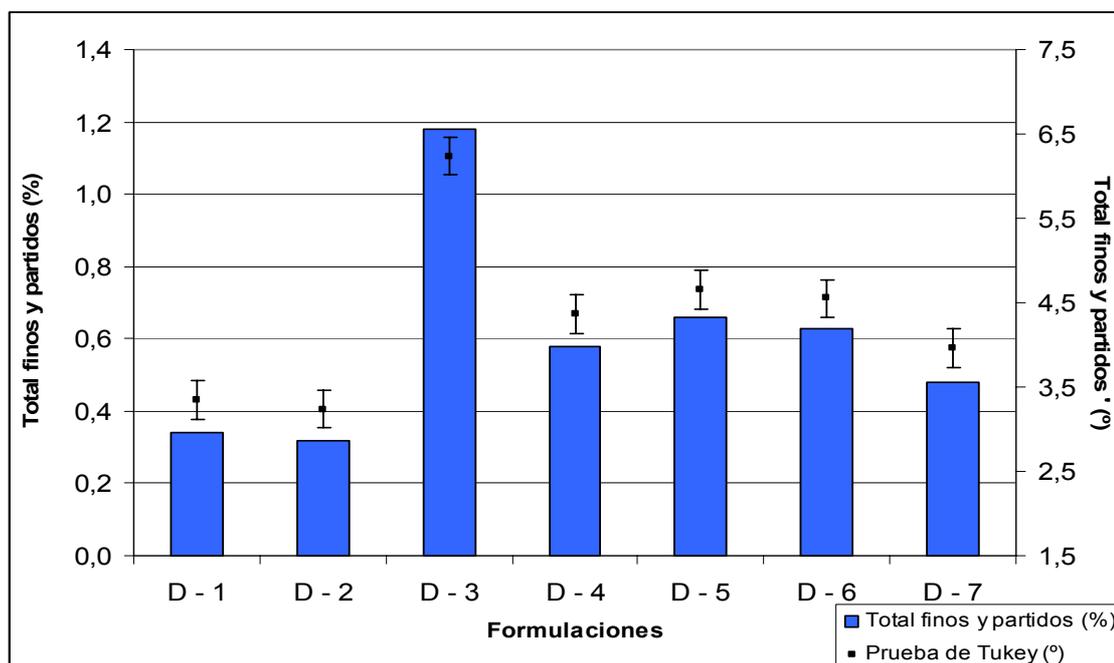


FIGURA 28. Finos y partidos y comparación de medias según formulación.

La ecuación 7 explica la producción de finos y partidos (durabilidad) en función de la fracción másica de constituyentes en el 12% del total de la dieta:

$$Fp = 0,38 w_{Tr} + 0,35 w_{Ta} + 1,07 w_{Av} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

- Fp : Finos y partidos, % p/p
- w_{Tr} : Fracción másica de harina de trigo
- w_{Ta} : Fracción másica de almidón de tapioca
- w_{Av} : Fracción másica de harina de avena

Los resultados obtenidos por la prueba de durabilidad, son similares a los obtenidos en el zarandeado del producto (producción de las dietas) destacándose como principal factor, de una baja durabilidad, la utilización de harina de avena. Para lograr una alta durabilidad del pellet es necesario utilizar solamente tapioca o harina de trigo; como se muestra en la FIGURA 29 y en la

Ecuación 7, ya que son los factores que tienen menor incidencia en la variable respuesta.

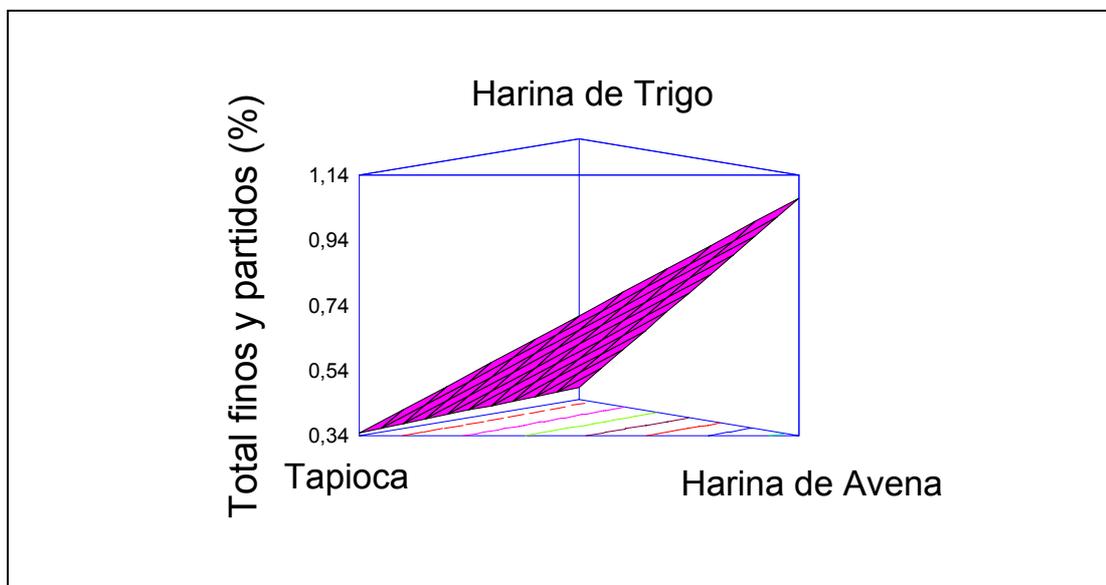


FIGURA 29. Superficie respuesta para finos y partidos.

Es necesario recordar que los niveles de gelatinización fueron adecuados para cada formulación (CUADRO 7), por lo que se descartó a este parámetro como una variable que explique las diferencias en la durabilidad.

Los resultados obtenidos, para esta variable respuesta, concuerdan con los informados por WENGER MANUFACTURING (1993) ya que indican que los almidones provenientes de tubérculos poseen una gran capacidad de generar pellets de muy buena cohesividad. En el caso de las formulaciones con harina de trigo, estas se encontrarían de cierta forma beneficiadas por el contenido de gluten, el cual ayudaría a incrementar la cohesión del pellet.

4.2.4 Densidad. La comparación estadística de los valores de densidad entregados para cada dieta, presentaron una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$). Las formulaciones que contenían harina de avena

presentaron una menor densidad en relación a las que contenían harina de trigo y tapioca; entre estas últimas dos no se encontró diferencia significativa (FIGURA 30).

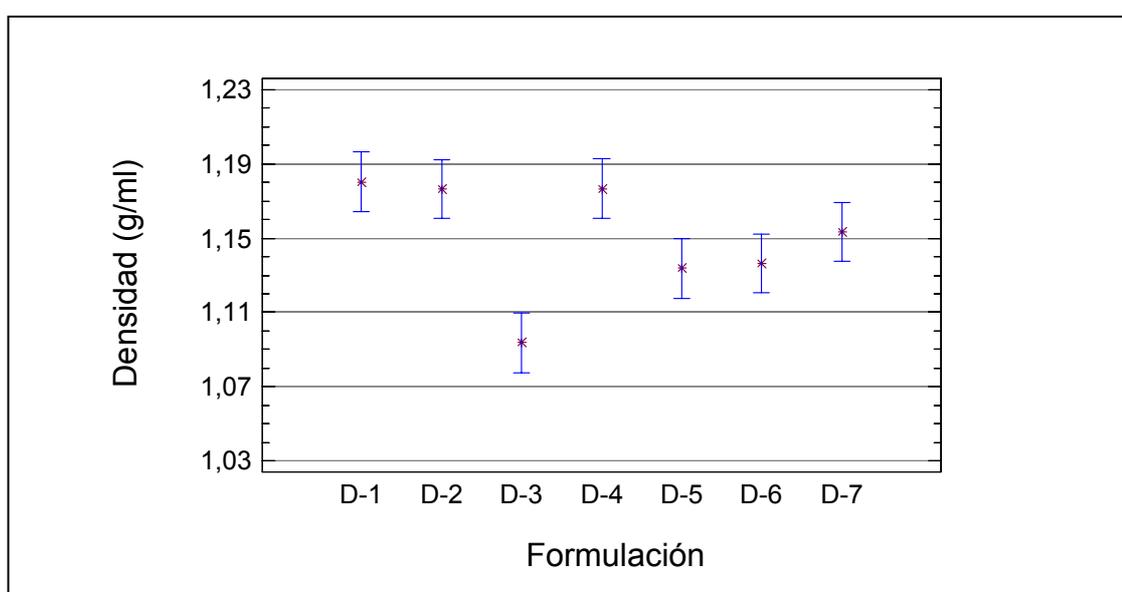


FIGURA 30. Comparación múltiple de la densidad del pellet.

El diseño de mezclas entrega un modelo lineal para la representación de la densidad con un R^2 ajustado de 99,1%. En la FIGURA 31 se destaca claramente que la harina de avena y sus mezclas con los otros ingredientes generan una disminución significativa en la densidad. Esta información es validada por la significativa ($p < 0,01$) relación entre los ingredientes y la densidad. La ecuación 8 explica la densidad del pellet:

$$\rho = 1,18 w_{Tr} + 1,17 w_{Ta} + 1,09 w_{Av} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

- ρ : Densidad, g/ml
- w_{Tr} : Fracción másica de harina de trigo
- w_{Ta} : Fracción másica de almidón de tapioca
- w_{Av} : Fracción másica de harina de avena

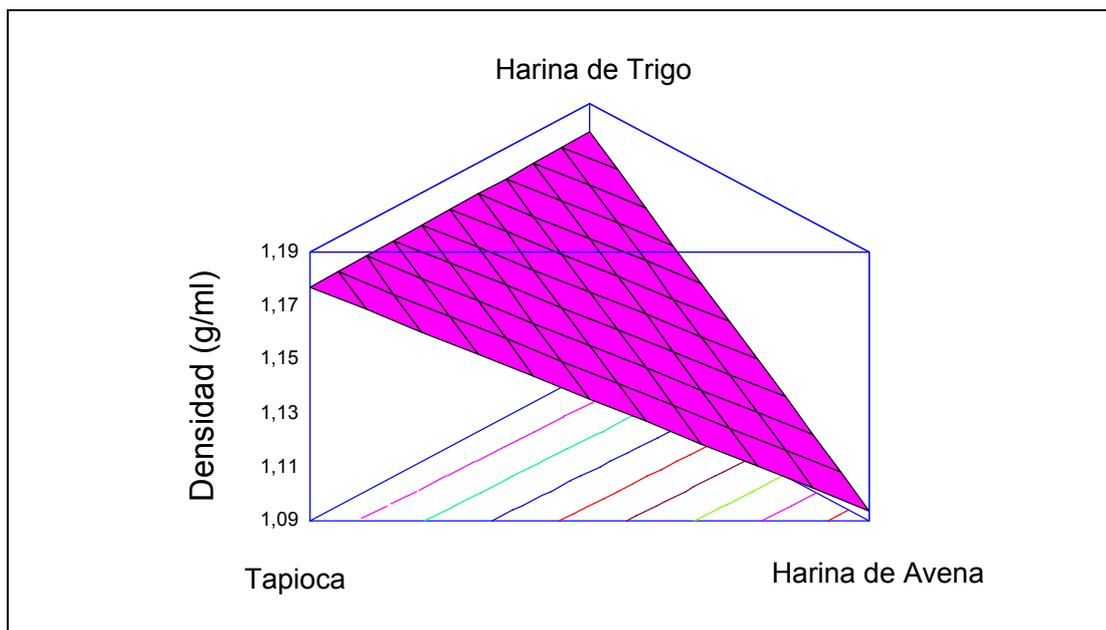


FIGURA 31. Superficie respuesta para la variable densidad.

Las diferencias encontradas en la densidad de las formulaciones extruídas, están en directa relación con la capacidad de absorber aceite, debido a que ambas variables están en función de la generación de poros o cavernas en el interior del pellet. La baja viscosidad que se obtiene al utilizar la harina de avena entrega condiciones favorables para generar un pellet poroso (gran liberación de las burbujas de agua), como se ha mencionado anteriormente.

4.2.5 Pruebas de compresión. Los resultados de la prueba de compresión, realizada con el equipo INSTRON, se muestran en la FIGURA 32. El análisis de varianza indica que existe diferencia significativa ($p < 0,05$) entre las fuerzas de compresión, requeridas para producir la ruptura del pellet, de las distintas formulaciones. Al evaluar la información de esta forma, al igual que en varias publicaciones de alimentos para animales, como por ejemplo CHEN *et al.* (1999), SUNDERLAND (1996), THOMAS y VAN DER POEL (1996) y WOOD (1987) se comete un grave error, obteniendo conclusiones falsas debido a que no se ha considera el tamaño de los pellets.

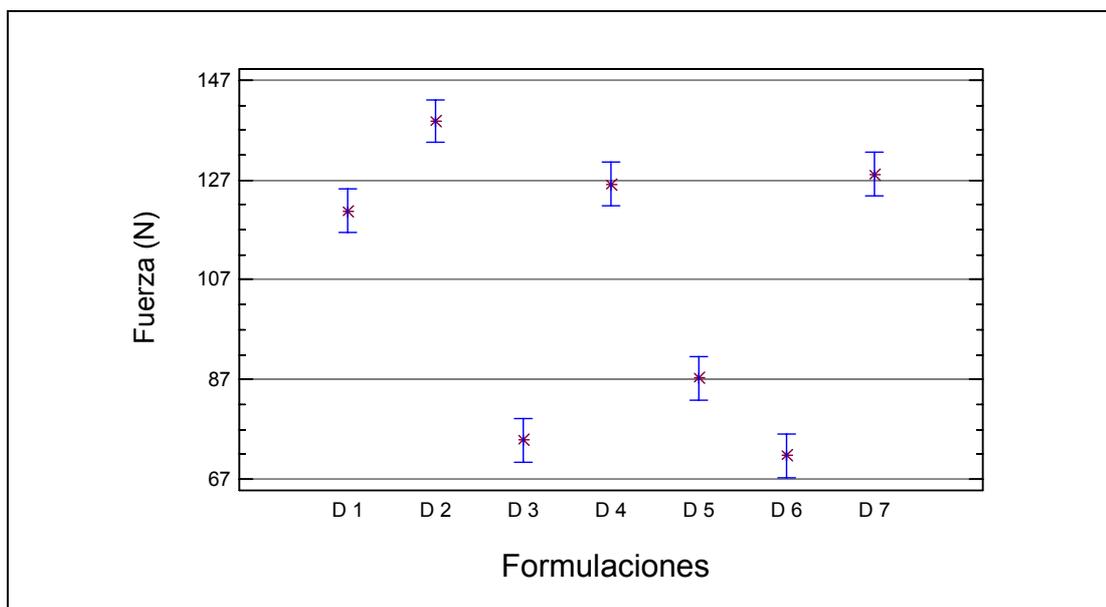


FIGURA 32. Comparación múltiple de la fuerza de ruptura del pellet.

Para una evaluación comparativa es necesario expresar la fuerza de ruptura como esfuerzo de ruptura, definido como fuerza de ruptura por unidad de superficie de compresión, ya que existen pequeñas diferencias en el tamaño de los pellets, diferencias ligadas al efecto producido por las diferentes fuentes de almidón y sus mezclas, considerando así los efectos de la expansión progresiva del área sometida a la compresión, es decir, al módulo de elasticidad (MOHSEIN, 1986) presentado en la FIGURA 33.

Existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en el módulo de elasticidad de las formulaciones evaluadas. En la FIGURA 33 se indica la diferencia significativamente menor del módulo de elasticidad que posee la formulación D - 3 al igual que la D - 6, ambas formulaciones contienen harina de avena, la primera en forma pura y la segunda mezclada con un 50% de almidón de tapioca. La formulación conformada con los tres ingredientes no tiene diferencia estadísticamente significativa con la mayoría de las demás formulaciones y sólo D - 5 tiene un módulo significativamente mayor que D - 7.

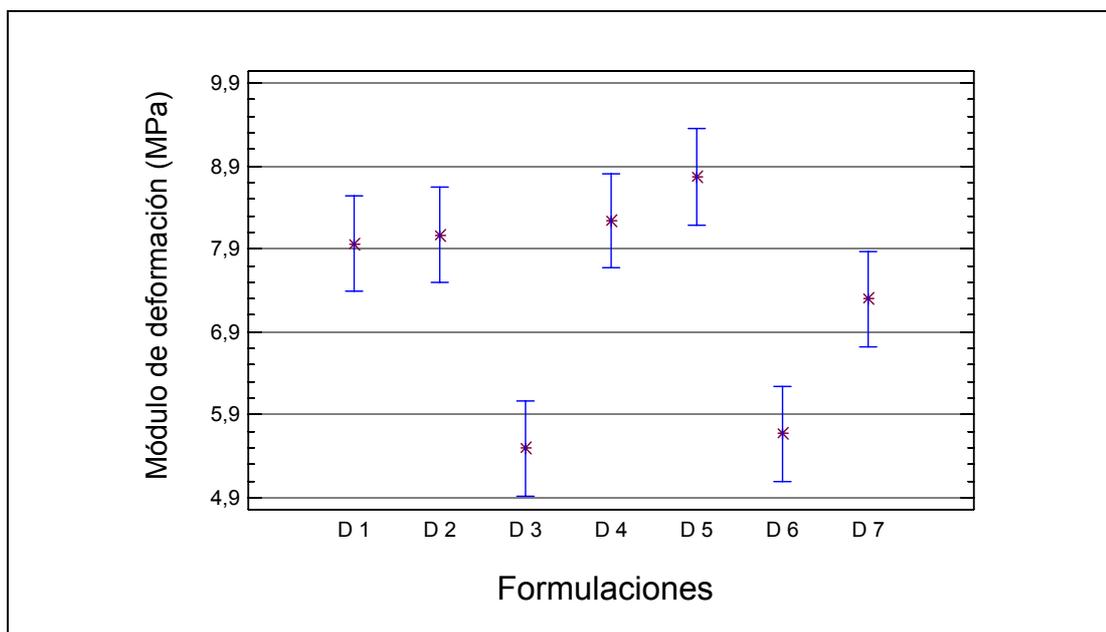


FIGURA 33. Comparación múltiple del módulo de elasticidad del pellet.

El bajo módulo de elasticidad presentado por la harina de avena, junto a la mezcla en partes iguales con almidón de tapioca, se debería a que este ingrediente tiene la propiedad de generar un pellet más poroso. Esto último se respalda en que los pellets constituidos con esta materia prima presentan una mayor capacidad de absorber lípidos (FIGURA 21) y una menor densidad (FIGURA 31). En el caso de la dieta formulada con harina de avena y harina de trigo, en partes iguales, el resultado podría estar influenciado por el contenido de gluten de la harina de trigo, entregando un módulo más elástico; debido a que el gluten podría generar un cambio en la forma y/o tamaño de los capilares producidos. Por último, es necesario recordar que las propiedades texturales del extruído dependen del tamaño y forma de sus celdas internas (MOORE *et al.*, 1990) y su resistencia disminuye a medida que el tamaño de las celdas aumenta (BARRET y PELEG, 1992 y YOSHITOMI, 2004), debilitando el extruído, por lo cual, es muy probable que esto último sea la causa de las diferencias en los módulos de elasticidad.

El análisis del diseño de mezclas no entregó una relación significativa ($p < 0,05$) entre los ingredientes y sus mezclas con el módulo de elasticidad. Esto nos indicaría, en rigor, que el módulo de elasticidad no sería dependiente de las fuentes de almidones utilizadas, pero debido a que los parámetros de proceso se mantuvieron constantes y que los cambios en las variables dependientes (torque, presión y temperatura de salida) están en función de las formulaciones evaluadas deja, solamente, como única opción el cambio de los ingredientes. Por último, es evidente que el resultado de este análisis está sesgado debido al efecto que podría haber ejercido el gluten en la formación de los poros, entregando un resultado atípico para la formulación D - 5, y junto a la gran similitud de los resultados obtenidos por las otras formulaciones. Esto último, nos indica que se requieren cambios fuertes en la formulación para producir diferencias importantes en el módulo de elasticidad.

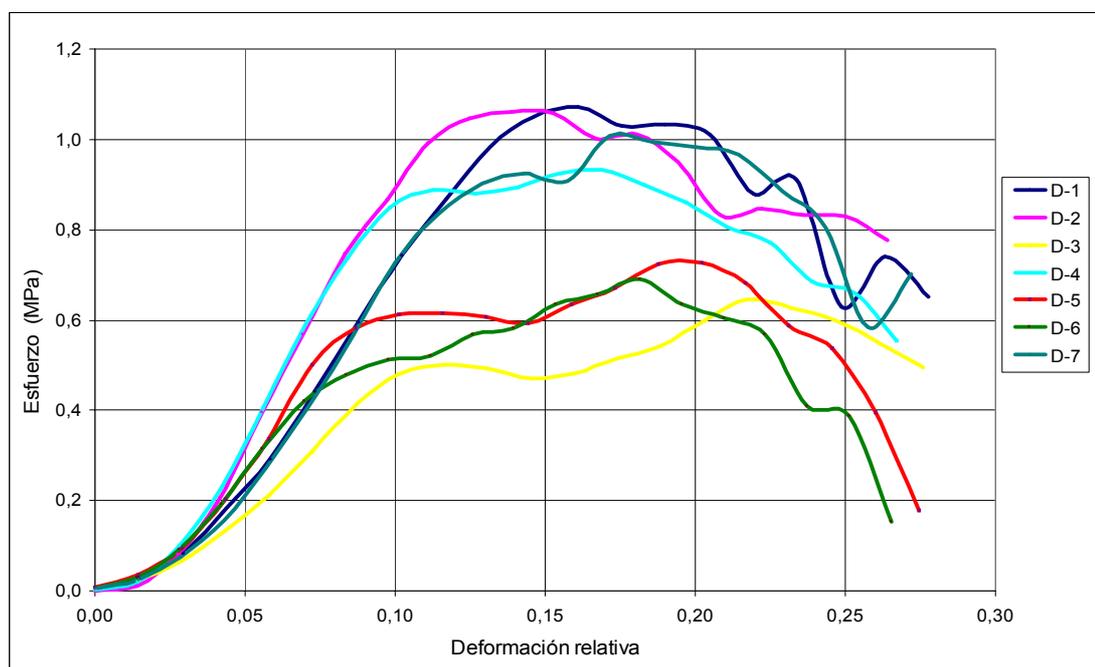


FIGURA 34. Esfuerzo en función de la deformación relativa para la prueba de compresión de pellets.

La FIGURA 34 muestra la gráfica del esfuerzo en función de la deformación relativa. La pendiente de esta gráfica equivale al módulo de elasticidad y el primer pico, al esfuerzo máximo. Una vez alcanzado el esfuerzo máximo se produce el rompimiento del pellet, los picos seguidos corresponden al rompimiento de sus fragmentos por lo que las curvas presentan un comportamiento errático. Cabe destacar que el comportamiento de las formulaciones con harina de avena (D - 3, D - 5 y D - 6) muestran un bajo esfuerzo máximo, pero destaca entre ellas la mezcla con harina de trigo la cual posee un valor más alto.

4.3 Análisis global de los ingredientes utilizados

Al evaluar toda la información obtenida en las diferentes mediciones y asociándolas entre sí, junto a los resultados obtenidos en el amilógrafo (FIGURA 35) y a la información de las características de los almidones indicada en el CUADRO 2, se entrega a continuación una inferencia global de las propiedades y potencial uso de cada ingrediente.

4.3.1 Harina de trigo. Aunque se utilizó como ingrediente de referencia, entregó valiosa información sobre su comportamiento en el proceso de extrusión y las características que presentan su producto final, destacándose la influencia que pueden producir otros componentes que contiene este ingrediente, refiriéndose en este caso al gluten, el cual afecta la expansión, disminuye la capacidad de absorber aceite y aumenta la densidad de los pellets. Es por esta razón que en las industrias de alimentos extruídos para peces se utilizan harinas altas en gluten para alimento de baja expansión y absorción de aceite y por el contrario, harinas bajas en gluten en alimentos que requieren una alta expansión y una alta absorción de aceite¹. En la FIGURA 35 se presenta el amilograma de este ingrediente, destaca el inicio de la gelatinización a una temperatura de 62°C y el pico de viscosidad de 700 UB a

¹ Comunicación personal Johnny Blanc, Director técnico Alimentos San Pablo Ltda.

86°C tras 16 minutos de calentamiento. El tiempo necesario para alcanzar el pico de viscosidad una vez iniciada la gelatinización, y en comparación de los otros dos amilogramas, nos indica que esta materia prima presenta distintos tamaños de gránulos de almidón y/o formas, lo que concuerda con la información del CUADRO 2 y FIGURA 3. Esta variación, puede causar propiedades no deseadas en el pellet, como por ejemplo la dextrinización de sus almidones. Aunque esta materia prima es la comúnmente usada en las plantas de alimentos para peces, es necesario conocer de mejor forma los efectos del gluten, con el fin de optimizar la calidad del producto final y la funcionalidad de este ingrediente.

4.3.2 Almidón de tapioca. Este producto mostró un aumento explosivo de la viscosidad en su amilograma (FIGURA 35), presentando además una temperatura de gelatinización de 58°C, siendo la más baja de los ingredientes en estudio, además mostró una alta resistencia a la temperatura sin disminuir su viscosidad. Este comportamiento tiene relación directa con características del producto final, ya que los pellets obtenidos con este ingrediente presentaron una baja absorción de aceite, una alta densidad y un mayor diámetro. Todo esto está directamente relacionado a la viscosidad de la pasta en el proceso, ya que ésta fue tal, que no dejó liberar las burbujas de vapor, obteniéndose así un pellet con una alta cantidad de agua. Es necesario destacar que las condiciones de proceso utilizadas fueron las adecuadas para la formulación con harina de trigo, por lo cual es posible que bajo otras condiciones de proceso, por ejemplo un aumento en la caída de presión a la salida del extrusor y una mayor temperatura en el proceso, se obtenga un pellet con una gran expansión y por ende una alta absorción de aceite, como lo informado por KEARNS (1998). Para lograr el objetivo antes descrito, es necesario realizar un experimento en el cual se considere un diseño factorial trabajando con variables como alimentación de agua y materias primas (carga), velocidad del tornillo y temperatura de calefacción del barril.

Los resultados obtenidos en este experimento, nos indican que la utilización correcta de este producto está enfocada a alimentos que no requieren una gran absorción de aceite y requieren de una alta densidad (rápido hundimiento) como por ejemplo dietas para salmones en sus primeras etapas o dietas para otras especies que requieran dietas bajas en lípidos.

4.3.3 Harina de avena. Este ingrediente presentó una rápida gelatinización, cinco minutos menos que la harina de trigo, y alcanzó una viscosidad similar a la obtenida con la harina de trigo (FIGURA 35) a igual temperatura (86°C), la rápida gelatinización nos indica que esta materia prima tiene gránulos de tamaños similares, información concordante con el CUADRO 2. Los pellets obtenidos se caracterizaron por una baja densidad, menor diámetro y una alta absorción de aceite, y además, presentaron una baja durabilidad debido a severas imperfecciones en la superficie del pellet. Esto último, según GUY (2001), se produce por una sobrecocción del producto, lo que se refleja en un encogimiento del pellet y un colapso de la estructura, debido a una baja viscosidad. Además, este ingrediente tiene un bajo tamaño de granos (CUADRO 2 y FIGURA 3), lo cual hace que posea una rápida transferencia de calor. La utilización de este ingrediente se debe enfocar a dietas que requieran una alta absorción de aceite, pero es necesario que se realice un experimento factorial para encontrar los parámetros óptimos de procesamiento (menor cocción). También se debe considerar la mezcla con harina de trigo, ya que en esta formulación se obtuvo la segunda más alta absorción de aceite.

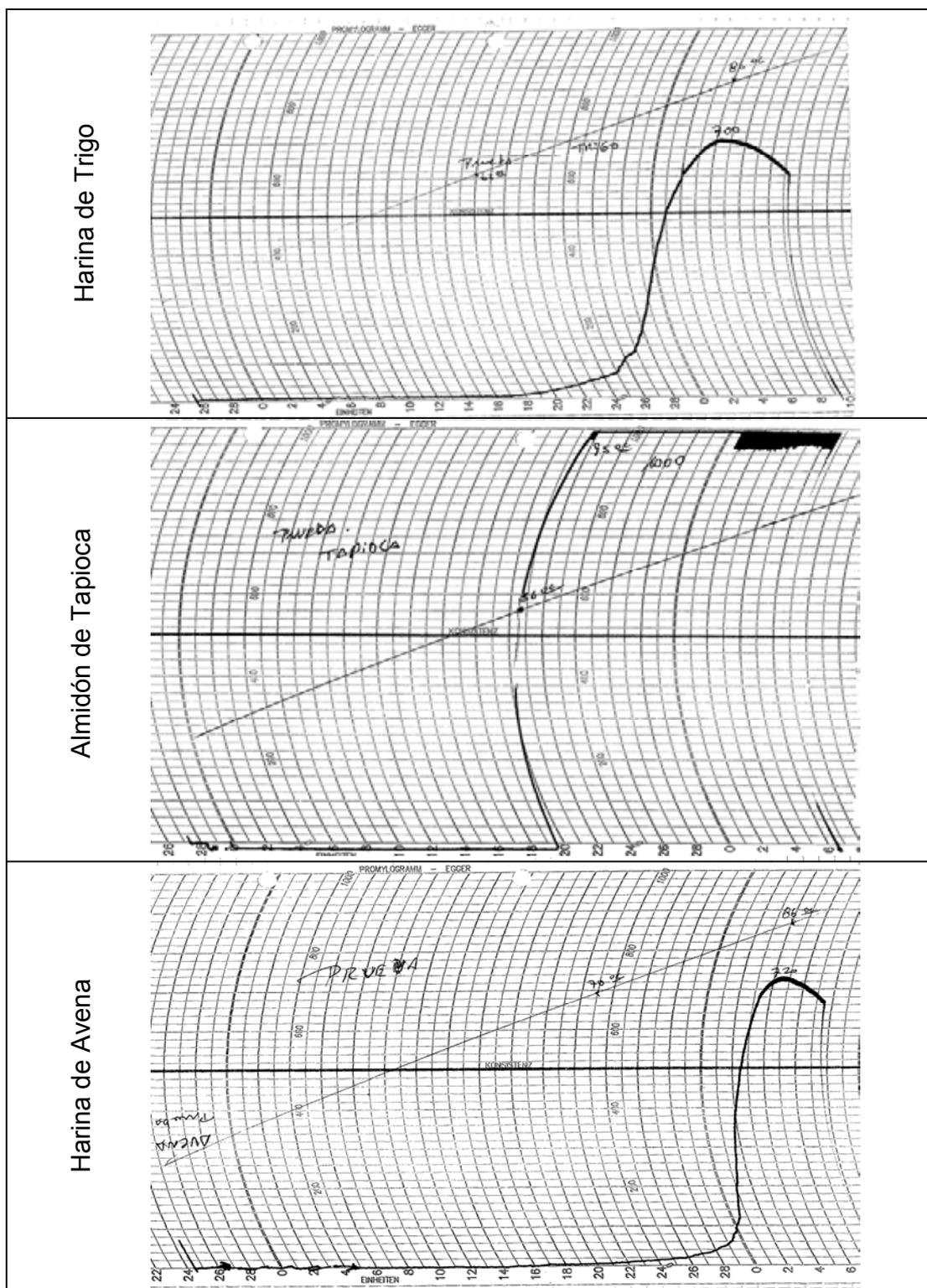


FIGURA 35. Amilogramas de los ingredientes evaluados.

5. CONCLUSIONES

- La utilización de diferentes fuentes de almidón, producen diferencias significativas en las características físicas del alimento extruído para salmones; elaborados bajo parámetros de proceso constantes.
- Es factible extrapolar los parámetros del proceso de extrusión utilizados a gran escala y aplicarlos exitosamente a nivel experimental, requiriendo solamente de pequeños ajustes.
- La harina de avena produjo pellets con mayor expansión axial, mayor absorción de aceite, menor densidad, bajo módulo de elasticidad y baja durabilidad. Los pellets fabricados con almidón de tapioca presentaron una mayor expansión axial y diametral, menor absorción de aceite y no presentó diferencias significativas en la durabilidad, densidad y módulo de elasticidad, en relación a los fabricados con harina de trigo. El comportamiento de los pellets, fabricados con la mezcla de ingredientes, entregaron resultados similares a los presentados por sus componentes en forma pura.
- El amilógrafo entregó información útil sobre las características de cocción del almidón, pero debe ser más estudiado como herramienta predictiva, estudio de correlación, del comportamiento de la masa en el proceso y de las características del producto final.

- Se recomienda la utilización de la harina de avena para la fabricación de dietas altas en energía, y el almidón de tapioca en dietas de baja energía en pellets de gran tamaño. Se recuerda que es necesario estudiar el efecto de los cambios en los parámetros de extrusión frente a las características del producto final.

6. RESUMEN

La extrusión de alimento para salmones es un proceso complejo, ya que las dietas están sometidas a continuos cambios en su formulación, dependiendo principalmente de la disponibilidad y precio de las materias primas utilizadas. La incesante búsqueda de materias primas más económicas o de mayor disponibilidad junto con el desarrollo de nuevas características del producto final requieren de una investigación y desarrollo de productos.

El objetivo de este estudio es conocer las propiedades físicas que entregan la harina de avena y el almidón de tapioca al alimento extruído para salmón; para ello se utilizó un diseño de mezclas del tipo simplex-centroide, el cual tiene la ventaja de evaluar estos ingredientes tanto en forma pura como en sus mezclas, manteniendo siempre constante la proporción global de la dieta. Este diseño generó siete dietas. Estas, se extruyeron bajo parámetros de proceso constantes, establecidos con una dieta control, la cual contenía harina de trigo. Los alimentos obtenidos presentaron variaciones significativas en sus características físicas. La harina de avena produjo pellets con mayor expansión axial, mayor absorción de aceite, menor densidad, bajo módulo de elasticidad y baja durabilidad. Los pellets fabricados con almidón de tapioca presentaron una mayor expansión axial y diametral, menor absorción de aceite y no presentó diferencias significativas en la durabilidad, densidad y módulo de elasticidad, en relación al control. El comportamiento de los pellets, fabricados con la mezcla de ingredientes, entregaron resultados similares a los presentados por sus componentes en forma pura. Se recomienda la utilización de harina de avena en dietas de alta energía, y el almidón de tapioca, para la fabricación de dietas de baja energía y de gran tamaño. Para la adecuada utilización de estas materias primas, es necesario realizar investigación con el fin de obtener los parámetros de proceso que optimicen estas propiedades.

SUMMARY

Extrusion of salmon feed is a complex process, since diets formulas are constantly changing as their constituents depend on cost and availability of raw materials. Research and product development activities are essential to discover less expensive and more abundant materials and to further develop a product with new and useful characteristics.

This study aims to assess the physical properties that oat flour and tapioca starch give to extruded salmon feed. Mixtures were studied following a simplex-centroid design which has the advantage of assessing constituents in their pure state or in mixture, keeping constant their global proportion in the diet. This design produced seven diets. All diets were extruded following a constant process under parameters established from a control diet made of wheat flour. Physical properties were significantly different among all final products. Oat flour pellets had greater axial expansion and oil absorption but lower density, lower modulus of elasticity and lower durability than the control diet. Tapioca starch pellets showed higher axial and diametric expansion and lower oil absorption than wheat flour pellets. Its durability, density and modulus of elasticity did not differ significantly from the control. Similar results were obtained when pellets were made of a mixture of both ingredients. This study recommends the use of oat flour for high energetic diets and tapioca starch for low energetic diets in large pellets. To improve the use of these two raw materials, further studies are required to develop processing parameters to improve their properties.

7. BIBLIOGRAFIA

- AARSETH, K . 2004. Attrition of feed pellets during pneumatic conveying: The influence of velocity and bend radius. *Biosystems Engineering*. 89 (2): 197-213.
- AARSETH, K. y PRESTLOKKEN, E. 2003. Mechanical properties of feed pellets: Weibull analysis. *Biosystems Engineering*. 84 (3): 349-361.
- ALVAREZ-MARTINEZ, L., KONDURY K. P. y HARPER J. M. 1988. A general model for expansion of extruded product. *Journal of Food Science* 53 (2): 609-615.
- ASAE. 2004. ASAE S368.4 DEC00. Compression test of food materials of convex shape. *ASAE Standards*. 585-592.
- ATWELL, W. A., HOOD, L. F., LINEBACK, D. R., VARRIANO-MARSTON, E. y ZOBEL, H. F. 1988. The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World* 33: 306-311.
- BADUY, S. 1998. *Diccionario de Tecnología de los Alimentos*. Alhambra Mexicana, México. 300p
- BARRETT, A. y PELEG, M. 1992. Extrudate cell structure-texture relationships. *Journal of Food Science*. 57 (5): 1253-1257.

- BELITZ, H.D. y GROSCH, W. 2000. Food Chemistry. Springer, Berlin, Germany. 992 p.
- BRIGGS, J. L., MAIER, D. E., WATKINS, B. A. y BEHNKE, K. C. 1999. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. Poultry Science. 78: 1464-1471.
- CAMIRE, M. E. 1990. Chemical and nutritional changes in food during extrusion. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 29 (1): 35-57.
- CHEN, Y., BEVERIDGE, M. y TELFER, T. 1999. Physical characteristics of commercial pelleted atlantic salmon feeds and consideration of implications for modelling of waste dispersion through sedimentation. Aquaculture International. 7 (2): 89-100.
- FAUBIO, J. y HOSENEY, R. 1982a. High temperature short time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. Cereal Chemistry. 59 (6): 529-533.
- FAUBIO, J. y HOSENEY, R. 1982b. High temperature short time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of protein and lipid on extrudate properties. Cereal Chemistry. 59 (6): 533-537.
- FENNEMA, O. 2000. Química de los alimentos. Editorial Acribia Zaragoza España. 1250 p.
- FORSTER, I. y HARDY, R. 2000. Energy. En : Encyclopedia of Aquaculture. New York. USA. 292-298

- FRAME, N. D. 1994. The technology of extrusion cooking. Blackie, London, England 920 p
- GUY, R. 1994. Raw material. En: The technology of extrusion cooking. FRAME, N. D., Editor (1994). Blackie, London, England. pp 52-72.
- GUY, R. 2001. Raw materials for extrusion cooking. En: Extrusion cooking, technologies and applications. GUY, R., Editor (2001). Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England. pp 3-26.
- GILL, C. 2002. Better product density control. Feed International. 112 (4): 4-6.
- HARPER, J. 1986. Extrusion texturization of foods. Food Technology. 47: 70-76.
- HERMANSSON, A. y SVEGMARK, K. 1996. Developments in the understanding of starch functionality. Trends in Food Science & Technology. 7 (11):345-353.
- HERTZEL, G., ROKEY, G., STRAHM, B. 2000. Product analysis laboratory. Wenger. 10 p.
- HSIEH, F. H. 1999. Extrusion Cooking. En: Wiley Encyclopedia of Food Science and Technology. Francis F. J., Editor (1999). John Wiley & Sons, New York, USA. pp 702-706.
- JACKSON, D. 2003. Starch: Structure, Properties, and Determination. En: Encyclopedia of Food Science and Nutrition, (2003) 2nd Edition: 5561-5567.

- KEARNS, J. P. 1998. Ingredient consideration, preparation of feeds, selection of extrusion equipment and automatic controls for extrusion of pet and aquatic feeds. En: Advances in extrusion technology. CHANG, Y. K. y WANG S. S., Editores (1998). Technomic publishing, Lancaster, USA. pp 97-105.
- LI, Y., WU, D., ZHANG, J., CHANG, L., WU, D., FANG, Z. y SHI, Y. 2000. Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts. Powder Technology 113: 176-184.
- LINDEN, G. y LORIENT, D. 2000. New ingredients in food processing. Woodhead Publishing, Cambridge, England. 550 p.
- LUND, D. 1984. Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition 20 (4):249-273.
- LYNN, A., PRENTICE, R. D. M., COCHRANE, M. P., COOPER, A. M., DALE, F., DUFFUS, C. M., ELLIS, R. P., MORRISON, I. M. PATERSON, L., SWANSTON, J. S. y TILLER, S. A. 1997. Cereal starch, properties in relation to industrial uses. En: Cereals: Novel Uses and Processes CAMPBELL, G. M., WEBB C., MCKEE L., Editores (1997). Plenum press, New York, USA. 69-77.
- MOHSEININ, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal material. Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA. 891 p
- MONCADA, L. 1996. Puntos de control en la fábrica de alimentos balanceados para la acuicultura. Memorias del Tercer Simposium Internacional de

Nutrición Acuícola, Noviembre de 1996, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México. 543-555.

MOORE, D., SANEI, A., VAN HECKE, E. y BOUVIER, J. 1990. Effect of ingredients on physical/structural properties of extrudates. *Journal of Food Science*. 55 (5): 1383-1387

MUNZ, K. 2004. Density control of aquatic feed with steam and venting. *Feedtech*, 8 (1): 20-22.

NEASE, T., TEDMAN P. 2003. Advances in aquatic feed manufacturing. www.extru-techinc.com/articlesadvancesinaquaticfeed.htm. Accessed in April, 2005.

RATNAYAKE, W. y JACKSON, D. 2003. Starch: Sources and Processing. En: *Encyclopedia of Food Science and Nutrition*, (2003). Revised 2nd Edition: 5567-5572.

RIAZ, M. N. 1997. Using extrusion to make floating and sinking fish feed: controlling the water stability of feed. *Feed Management*, 48 (1): 21-24.

ROKEY, G. y PLATTNER, B. 2003. A practical approach to aquafeed extrusion. *Feed Management*, 54 (1): 24-26.

ROKEY, G. y PLATTNER, B. 2004. Extruded aquafeeds: controlling buoyancy. *Feed Management*, 55 (1): 6-10.

STRAHM, B. y PLATTNER, B. 2001. Put the right tools in your toolbox to ease aquafeed extrusion. *Feed Management* 52 (3): 19-22

- SUNDERLAND, R. 1996. Interactions of minor ingredients in extrusion of sinking aquatic feeds. VII international Symposium on Nutrition and Feeding of Fish. College Station. Texas.
- THOMAS, D. J., ATWELL, W.A. 2004. Starches. The Eagan Press Handbook Series, New York, USA. 101p
- THOMAS, M., HUIJNEN, P., VAN VLIET, T., VAN ZUILICHEM, D.J. y VAN DER POEL, A. 1999. Effects of process conditions during expander processing and pelleting on starch modification and pellet quality of tapioca. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 79:1481-1494.
- THOMAS, M. y VAN DER POEL, A. F. B. 1996. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science Technology* 61: 89-112.
- WANG, S., CHIANG, W., ZHAO, B. y KIM, I. 1991. Experimental analysis and computer simulation of starch-water interactions during phase transition. *Journal of Food Science*. 56(1): 121-124.
- WENGER MANUFACTURING.1993. Process Description, Pet and Aquatic Feed Production. 25 p.
- WOOD, J. F.1987. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Animal Feed Science and Technology*. 18: 1-17.
- YOSHITOMI, B. 2004. Effect of extrusion cooking temperature on the microstructure of extruded pellet. *Fisheries Science*. 70: 1157-1163.