



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán

**Aplicación del proceso de extrusión en la elaboración de  
proteína texturizada a base de soya (*Glycine max L.*)**

T E S I S

Que para obtener el Título de

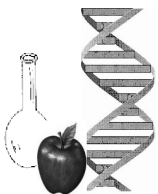
Ingeniera en Alimentos

Presenta

Rodríguez Carmona Janet

Asesor de Tesis:

M. en C. Valderrama Bravo María Del Carmen



Cuautitlán Izcalli, México

2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.  
**ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS**  
SUPERIORES CUAUTITLAN



**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E**

DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

**ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

Aplicación del Proceso de Extrusión en la Elaboración de  
Proteína Texturizada a Base de Soya (Glycine Max L.)

que presenta La pasante: Janet Rodríguez Carmona  
con número de cuenta: 40302081 8 para obtener el título de :  
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 11 de Marzo de 2008

**PRESIDENTE**

IA. Laura Margarita Contazar Figueroa

**VOCAL**

IBQ. Saturnino Maya Ramírez

**SECRETARIO**

MC. María del Carmen Valderrama Bravo

**PRIMER SUPLENTE**

IA. Miriam Edith Fuentes Romero

**SEGUNDO SUPLENTE**

IA. María Guadalupe Morales Cabral

## *Dedicatorias:*

### **Al Señor**

Por haberme permitido la culminación de este largo camino, y estar satisfecha conmigo por mi esfuerzo, dedicación y amor a mis estudios y mi empleo, por siempre bendíceme.

### **A la UNAM**

Por que me permitiste haber sido comunidad puma, saber que nunca te defraudaré y estaré siempre orgullosa de tener el corazón dorado.

### **A mis padres**

Por que sin su apoyo hubiera sido difícil estar ahora con mi título, gracias por todo este tiempo a mi lado, espero sigamos juntos por mucho tiempo mas, para que ahora que me toca emprender el vuelo sigan aun mas orgullosos de su hija.

### **A toda mi familia**

Saber que siempre estaré agradecida por su apoyo de todas las formas posibles y por los momentos agradables en mi vida.

### **A mi amiga Verenice**

Sabes, es tan agradable tener una verdadera amiga, que siempre ha estado a mi lado, gracias por todo tu apoyo tus consejos y tu gran amistad, que por siempre perdure.

### **A mi amor Alejandro**

Por tu infinito e incondicional amor, gracias por tu apoyo, por ser ante todo mí amigo y espero que la vida nos fructifique los años que hemos vivido juntos, te amo.

### **A mis compañeros de generación**

Les deseo lo mejor y cuando nos encontremos en el ámbito laboral apoyarnos como una verdadera comunidad puma.

### **A mi asesora de tesis**

A la maestra Carmen Valderrama, por que me apoyo hasta el final de este trabajo, gracias por sus consejos y por compartir sus conocimientos.

### **A la profesora Laura Cortazar**

Gracias, por que durante

la carrera siempre mantuvimos una buena amistad, de apoyo, consejos, y ojala esta amistad perdure por mucho tiempo mas.

## ÍNDICE GENERAL

	Nº	Página
Índice de tablas	7	
Índice de figuras	7	
INTRODUCCIÓN	9	
JUSTIFICACIÓN	11	
OBJETIVOS	12	

### CAPITULO 1

1.- Generalidades de la soya	13	
1.1.- Historia de la soya	13	
1.2.- Morfología y taxonomía	13	
1.3.- Exigencias en clima	15	
1.4.- Exigencias en suelo	16	
1.5.- Material vegetal	16	
1.6.- Cultivo	17	
1.7.- Control de malas hierbas	18	
1.8.- Enfermedades	20	
1.9.- Recolección y aprovechamiento	20	
1.10.- Composición química	21	
1.11.- Aspectos nutrimentales y de salud del frijol de soya	24	
1.11.1.- La alergia a la soya	25	

### CAPITULO 2

2.- Equipos de extrusión	27	
2.1.- Definición de extrusión	27	
2.2.- Aspectos históricos de la extrusión	27	
2.3.- Ventajas del proceso de extrusión	30	
2.4.- Aplicaciones de la extrusión	31	
2.4.1.- Otras aplicaciones	32	
2.5.- Mecanismo de transformación en el proceso de extrusión	32	
2.6.- Transferencia de calor en el proceso de extrusión	34	
2.6.1.-Consideraciones para el balance térmico global en el extrusor	35	
2.6.2.-Consideraciones para los balances de materia y energía	35	

2.7.- Zonas de proceso en el extrusor	36
2.8.- Elementos cónicos	46
2.9.- Condiciones de proceso	47
2.9.1.-Variables dependientes	47
2.9.2.-Variables independientes	47
2.10.- Clasificación de los extrusores	47
2.10.1.- De acuerdo a la temperatura	49
2.10.2.- De acuerdo a la generación de calor	49
2.10.3.- De acuerdo al contenido de humedad	50
2.10.4.- Extrusores de tornillo único	51
2.10.4.1.- Amplitud de cizallamiento	52
2.10.4.2.- Propulsión del extrusor	53
2.10.4.3.- Diseño del tornillo y cilindro para extrusores de tornillo único	53
2.10.5.- Extrusores de tornillo doble	55
2.10.5.1.- Tipos de extrusores de tornillo doble	56
2.10.5.2.- Diseño de la propulsión del doble tornillo	58
2.11.- Criterios de selección del tipo de extrusor	59

### CAPITULO 3

3.- Efecto del proceso de extrusión en los componentes nutritivos	62
3.1.- Materias primas en extrusión	62
3.1.1.- Materiales formadores de estructura	63
3.1.2.- Materiales que llenan la fase dispersa	65
3.1.3.- Sólidos solubles	66
3.1.4.- Sustancias nucleantes	66
3.1.5.- Sustancias aromatizantes	66
3.1.6.- Sustancias colorantes	66
3.1.7.- Ingredientes que actúan como plastificantes y lubricantes	67
3.2.- Extrusión y cambios físicoquímicos en los nutrientes	68
3.2.1.- Almidón	69
3.2.2.- Proteínas	72
3.2.3.- Lípidos	75
3.2.4.- Vitaminas	77
3.2.5.- Toxinas	78
3.2.6.- Sólidos solubles	79
3.2.7.- Sabores	79
3.2.8.- Fibra dietética	80
3.2.9.- Minerales	80
3.2.10.- Fotoquímicos	80

## CAPITULO 4

4.- Tecnología de la soya	81
4.1.-Obtención de harinas y proteína de la soya	81
4.2.-Otros productos de soya en la industria de alimentos	85
4.3.-Proteína vegetal texturizada	88
4.3.1.- ¿Qué es una proteína vegetal texturizada?	88
4.3.2.- Otra definición de proteína vegetal texturizada	88
4.4.- Aplicaciones de la proteína vegetal texturizada	89
4.5.- Ventajas de las proteínas vegetales frente a las de origen animal	89
4.6.- Proceso de elaboración de proteína vegetal texturizada (PVT)	90
4.7.- Aditivos en la proteína vegetal texturizada	99
4.8.- Parámetros de control de calidad aplicados a las proteínas vegetales texturizadas	101
4.9.-Costos de la proteína vegetal texturizada	103
 CONCLUSIONES	 107
 RECOMENDACIONES	 108
 BIBLIOGRAFÍA	 111

## Índice de Tablas

	<b>Título</b>	<b>Nº Página</b>
Tabla. 1	Variedades comerciales de soya clasificadas por grupos	17
Tabla. 2	Plagas que atacan a la soya	19
Tabla. 3	Composición Química de la semilla de soya	22
Tabla. 4	Composición media de la semilla seca de soya y de sus partes	23
Tabla. 5	Clasificación de extrusores de tornillo único según cizallamiento	52
Tabla. 6	Productos a base de proteína	64
Tabla. 7	Productos a base de almidón	64
Tabla. 8	Cambios generales en la extrusión	68
Tabla. 9	Factores que aumentan la expansión de los materiales almidonosos	71
Tabla.10	Cambios proteicos durante la extrusión	72
Tabla.11	Factores de la extrusión que afectan la oxidación lipídica	77
Tabla.12	Parámetros que influyen en la destrucción de vitaminas	78
Tabla.13	Variedad de precios y presentaciones de Proteína Vegetal Texturizada en diferentes tiendas departamentales	103
Tabla.14	Zonas ANTAD	106

## Índice de Figuras

	<b>Título</b>	<b>Nº Página</b>
Figura. 1	Esquema de la flor y frijol de soya	15
Figura. 2	Partes fisiológicas del frijol de soya	23
Figura. 3	Texturizados a base de soya	32
Figura. 4	Esquema de cizallamiento dentro de un extrusor	33
Figura. 5	Esquema de las diferentes formas de calor ocurridas en un extrusor	34
Figura. 6	Tolvas con grados de inclinación diferentes para productos harinosos	37
Figura. 7	(a) Tolva con vibración (b) Tolva para materiales de fluidez lenta	37
Figura. 8	Esquema de una extrusora y las zonas de proceso	38
Figura. 9	Pre-acondicionador con sistema de alimentación	39
Figura. 10	Materiales de alimentación hacia el pre-acondicionador	39
Figura. 11	Perfiles de la rosca del tornillo	40
Figura. 12	Grafica de las zonas de procesado en extrusión	42
Figura. 13	Orientación del elemento de amasado	42
Figura. 14	Componentes del flujo de los tornillos en extrusión	43
Figura. 15	Configuraciones típicas de las paredes del cilindro de los extrusores	44



Figura. 16	Extrusor de doble tornillo con elementos cónicos	46
Figura. 17	Extrusor de doble tornillo sin elementos cónicos	46
Figura. 18	Configuraciones de los tornillos para extrusión	48
Figura. 19	Vista transversal de un sistema de extrusión de tornillo unico	51
Figura. 20	Configuraciones comunes de tornillos para extrusores de tornillo único	54
Figura. 21	Diseño y terminología para los tornillos de los extrusores	55
Figura. 22	Tornillos Inter-engranados en contra-rotación	56
Figura. 23	Tornillos Inter-engranados en co-rotación	57
Figura. 24	Propulsión para tornillo doble en un extrusor	58
Figura. 25	Caja de cambio y propulsión para tornillo doble	58
Figura. 26	Materias primas para extrusión	62
Figura. 27	Principales fuentes de almidón	69
Figura. 28	Estructura química del almidón	70
Figura. 29	Comparación de almidones dentro de un extrusor	70
Figura. 30	Desnaturalización de proteínas	73
Figura. 31	Efecto de la temperatura de extrusión sobre las proteínas	74
Figura. 32	Proteína degradada dentro del proceso de extrusión	75
Figura. 33	Proceso de elaboración de productos a base de soya	81
Figura. 34	Diagrama de bloques para elaborar proteína vegetal texturizada	90
Figura. 35	Diagrama de flujo para obtener proteína vegetal texturizada	91
Figura. 36	Esquema del equipo extrusor del diagrama de flujo para obtener proteína vegetal texturizada	92
Figura. 37	Pre-acondicionadores utilizados en la extrusión de PVT	93
Figura. 38	Esquema típico de un secador de bandejas	98
Figura. 39	Canal de distribución básico y márgenes de comercialización	105

## INTRODUCCIÓN

La soya es considerada como la planta más eficiente en la producción de proteínas de buena calidad, puede proveer cinco veces más proteína aprovechable por acre de tierra cultivada.

En la actualidad, el frijol de soya ha sido modernizado tecnológicamente de diversas formas para atraer a los consumidores interesados en la salud. Es la única oleaginosa que contiene once aminoácidos esenciales en la proporción correcta para la salud humana (Cambero, 1998).

Los beneficios del uso de las proteínas de soya en sistemas de productos procesados, continúa expandiéndose con las siempre cambiantes necesidades del mercado, estas son:

- Actitudes del consumidor.
- Mejora del aspecto saludable y valor nutricional percibidos por el consumidor.
- Nutrición en cuanto a la proteína de buena calidad, virtualmente sin grasa ni colesterol.
- Calidad del producto.
- Mejora en la funcionalidad del producto.

Se ha observado que en muchos países, especialmente los occidentales, con tradición culinaria basada en las proteínas animales, todavía están en vías de imponerse en la cocina cotidiana el uso de la soya, el consumo del frijol y sus derivados. La soya es un producto de origen agrícola que mayor aprovechamiento ha logrado el hombre, tanto para su alimentación como para otros usos, ésta no es la base para medir la dieta en función de proteínas y nutrientes que el cuerpo necesita, sin embargo la difusión de la proteína vegetal de soya es tan extensa en programas de almuerzos escolares, alimentos horneados comerciales, bebidas de dieta y alimentos de comida rápida, entre otros, así estos alimentos son promovidos fuertemente en países en vías de desarrollo y forman la base de muchos programas de alimentos donados en zonas marginadas, por lo tanto la manera mas rápida de obtener aceptabilidad de un producto, y principalmente proveniente de una semilla agrícola con temas en discusión en cuanto a sus beneficios o no, es hacer que el producto sea consumido por sus méritos. Como las proteínas de la carne, leche y huevo, las proteínas de la soya son de buena calidad, pero éstas no contienen colesterol y virtualmente no contienen grasas saturadas.

Por lo que el uso de proteínas de soya se sigue incrementando por considerarse un ingrediente útil y económico en la preparación de una infinidad de productos alimenticios.

La tecnología de extrusión demuestra ser un procedimiento de bajo costo para la modificación del fríjol de soya a una estructura fibrosa muy similar a la carne. El proceso de fabricación persigue eliminar los factores antinutritivos termoestables presentes en la soya, tales como los oligosacáridos rafinosa y estaquiosa.

Por la gran diversidad y principalmente los aportes de salud que ofrece la soya, se ha podido industrializar como proteína texturizada, así, la extrusión es un caso de transferencia de tecnología, que nació en el sector de los plásticos y posteriormente se aplicó con éxito en el de la agroalimentación, debido a que el proceso puede ser controlado en un amplio rango de condiciones y operaciones, se ha podido utilizar en la industria alimentaria para cereales y oleaginosas entre otros tantos productos, capaz de efectuar un número de operaciones, incluyendo cocción, formación, texturización y deshidratación, éstas operaciones están contenidas en una pieza de equipo compacto, el cual desperdicia poca energía y necesita únicamente una pequeña cantidad de espacio. De igual manera, es cierto que algunas de las ventajas que aporta la extrusión pueden conseguirse por otras vías, pero también las alternativas son específicas y no poseen la diversidad de aplicaciones de la extrusión, con esta operación se ha podido dar diversificación a las materias primas como, texturas, formas y densidades para poder obtener productos atractivos que a simple vista puedan ser adquiridos por el consumidor.

## JUSTIFICACIÓN

La cantidad de proteínas que contiene la soya oscila entre un 30 y un 45 % (González, 2006). Por lo tanto contiene casi el doble de proteínas que la carne. El aceite del frijol de soya también es de muy buena calidad, porque entran en su constitución, ácidos grasos no saturados y esenciales en una alimentación equilibrada.

La soya es un ingrediente benéfico para la salud. Las consideraciones por parte del consumidor demuestran una búsqueda por alimentos más saludables. Así una gran mayoría de los consumidores contemplan hoy las cuestiones relacionadas con la salud a la hora de elegir sus alimentos. Esta tendencia se ve reflejada en un significativo crecimiento del mercado de alimentos de soya en todo el país.

Los consumidores son cada vez más conscientes del papel que juega la proteína de soya en los siguientes aspectos, (Rosenstein, 2005) & (Soy, isoflavones and breast cancer risk in Japan, 2003).

- Salud del corazón (reducción del colesterol)
- Salud ósea (mayor densidad mineral ósea)
- Alivio de la sintomatología de la menopausia
- Prevención del cáncer (de mama, próstata, tiroides)
- Nutrición basada en el rendimiento (recuperación muscular más rápida)

Por las razones anteriores es importante dar a conocer el consumo de soya en sus diferentes presentaciones, principalmente a la proteína vegetal texturizada, producto que va dirigido a personas de todas las edades y niveles económicos.



## **1.- GENERALIDADES DE LA SOYA**

### **1.1.- Historia de la Soya**

Algunas leguminosas u oleaginosas, principalmente la soya se cultivan en Asia desde hace aproximadamente 5000 años y ha desempeñado desde entonces un papel crucial en la alimentación de los pueblos orientales como el chino y el japonés. De allí se extendió a la mayor parte de los países de Asia, a algunos países de Europa y posteriormente al Continente Americano.

Por definición las leguminosas son las plantas de la familia *leguminosae*, que se utilizan como alimentos en forma de vainas o granos verdes y semillas secas, esta definición incluye a las oleaginosas. En 1940 son clasificados 280 tipos o variedades, obtenidas de China, Japón, India, Corea, Java y Taiwán (Planeta soja, 2008). Después de la segunda guerra mundial se empieza a valorar la importante utilización de la planta como suministradora al mismo tiempo de aceite y proteínas. En Europa el interés por la soya comienza a principios de 1999, incluso en el jardín real (Inglaterra) habían sido cultivadas semillas traídas por los misioneros desde China. Hasta la guerra entre China y Japón (1894-1895) la producción estaba localizada sobre todo en China y sólo mas tarde Japón comenzó a importar derivados de la soya, pero para usarlos como fertilizantes. A las mesas mexicanas llegó hace algunas décadas, sin embargo se destinó únicamente a la alimentación de animales hasta que se descubrió su importancia nutricional (Planeta soja, 2008).

### **1.2.- Morfología y Taxonomía**

**Familia:** Oleaginosas

**Especie:** *Glycine max* L.

**Origen:** Procede de otra especie silvestre (*Glycine ussuriensis*). Su origen se sitúa en el Oriente (China, Japón, Indochina) (Planeta soja, 2008).

**Planta:** Planta herbácea anual, de primavera-verano, cuyo ciclo vegetativo oscila de tres a siete meses y de 40 a 100 cm de envergadura<sup>1</sup>. Las hojas, los tallos y las vainas son pubescentes<sup>2</sup>, variando el color de los pelos de rubio a pardo más o menos grisáceo.

**Tallo:** Rígido y erecto, adquiere alturas variables, de 0,4 a 1,5 metros, según variedades y condiciones de cultivo. Suele ser ramificado. Tiene tendencia a encamarse, aunque existen variedades resistentes al vuelco<sup>3</sup>(ASA, 2008).

**Sistema radicular:** Es potente, la raíz principal puede alcanzar hasta un metro de profundidad, aunque lo normal es que no sobrepase los 40-50 cm. En la raíz principal o en las secundarias se encuentran los nódulos, en número variable (ASA, 2008).

**Hojas:** Son alternas, compuestas, excepto las basales, que son simples, son trifoliadas, con los folíolos oval-lanceolados, color verde característico que se torna amarillo en la madurez, quedando las plantas sin hojas.

**Flores:** Se encuentran en inflorescencias racimosas axilares en número variable, son amariposadas y de color blanquecino o púrpura, según la variedad.

**Fruto:** La longitud de la vaina es de dos a siete centímetros, cada fruto contiene de tres a cuatro semillas (ver Figura 1).

**Semilla:** La semilla generalmente es esférica, del tamaño de un guisante y de color amarillo como en la Figura 1. Algunas variedades presentan una mancha negra que corresponde al hilo de la semilla. Su tamaño es mediano (100 semillas pesan de 5 a 40 gramos, aunque en las variedades comerciales oscila de 10 a 20 gramos). La semilla es rica en proteínas y en aceites. En algunas variedades mejoradas presentan alrededor del 40-42% de proteína y del 20-22% en aceite, respecto a su peso seco. En la proteína de soya hay un buen balance de aminoácidos esenciales, destacando lisina y leucina.

---

<sup>1</sup> ENVERGADURA: Distancia de la punta de una hoja a la punta de otra hoja.

<sup>2</sup> PUBESCENTES: Estado inmaduro.

<sup>3</sup> VUELCO: Forma de enrollarse o dar vuelta sobre una superficie.



Figura. 1. Esquema de la flor y fríjol de soja (Planeta soja, 2008).

### 1.3.- Exigencias en clima

Las temperaturas óptimas para el desarrollo de la soja están comprendidas entre los 20 y 30° C, siendo las temperaturas próximas a 30° C las ideales para su desarrollo. El crecimiento vegetativo de la soja es pequeño o casi nulo en presencia de temperaturas próximas o inferiores a 10° C, quedando frenado por debajo de los 4° C. Sin embargo, es capaz de resistir heladas de – 2 a – 4° C sin morir. Temperaturas superiores a los 40° C provocan un efecto no deseado sobre la velocidad de crecimiento, causando daños en la floración y disminuyendo la capacidad de retención de legumbres. Las temperaturas óptimas oscilan entre los 15 y los 18° C para la siembra y los 25° C para la floración (Planeta soja, 2008). Sin embargo, la floración de la soja puede comenzar con temperaturas próximas a los 13° C. Las diferencias de fechas de floración, entre años, que puede presentar una variedad, sembrada en la misma época, son debidas a variaciones de temperatura (SAGARPA, 2008).

La soja es una planta sensible a la duración del día, es una planta de día corto, es decir, que para la floración de una variedad determinada, se hacen indispensables unas determinadas horas de luz, mientras que para otra no. Respecto a la humedad, durante su cultivo, la soja necesita al menos 300 mm de agua, que pueden ser en forma de riego cuando se trata de regadío, o bien en forma de lluvia en aquellas zonas templadas húmedas donde las precipitaciones son suficientes (ASA, 2008).



#### **1.4.- Exigencias en suelo**

La soya no es muy exigente en suelos muy ricos en nutrientes, por lo que a menudo es un cultivo que se emplea como alternativa para aquellos terrenos poco fertilizados que no son aptos para otros cultivos.

Se desarrolla en suelos neutros o ligeramente ácidos, con un pH de 6 hasta la neutralidad se consiguen buenos rendimientos.

Es especialmente sensible a los encharcamientos del terreno, por lo que en los de textura arcillosa con tendencia a encharcarse no es recomendable su cultivo. Si el terreno es llano, debe estar bien nivelado, para que el agua no se estanque en los rodales, sin embargo es una planta que requiere mucha agua, por lo que en los terrenos arenosos deberá regarse con frecuencia. La soya es algo resistente a la salinidad.

#### **1.5.- Material vegetal**

Las variedades de soya se clasifican en diez grupos en función de su madurez y la duración de su ciclo vegetativo, numerados desde el 00 hasta VIII. La soya es una planta cuya floración está íntimamente ligada con la duración del día.

Por ello, además de las condiciones de temperatura, humedad y suelo, habrá que considerar para la elección del período de siembra de cada variedad, cual es la duración del día en una situación geográfica determinada.

Existen más de tres mil variedades de soya, con ciclos vegetativos que fluctúan desde los noventa días hasta cerca de los doscientos, y con diferentes exigencias en cuanto a la duración del día, en la Tabla 1, se observa que dependiendo de las variedades y en donde se encuentre el cultivo es la duración de la floración del frijol y este estatus indica el tiempo de madurez y la posible cosecha del mismo (ASA, 2008).

Tabla. 1. Variedades comerciales de soja clasificadas por grupos (Planeta soja, 2008).

<b>Grupo</b>	<b>Variedades</b>	<b>Ciclo (días)</b>
00	Portage	90-95
0	Merit, Traverse	105-110
I	Chippewa 64, Hark, Wirth	112-118
II	Harosoy 63, Lindarin 63, Amsoy, Corsoy, Beeson	122-128
III	Shelby, Wayne	132-135
IV	Clark 63, Kent, Cutler, Calland	137-147
V	Hill, Dare	152-163
VI	Lee	168-175
VII	Bragg	178-188
VIII	Hampton, Hardee	190-195

### **1.6.- Cultivo**

La preparación del suelo comprende la adopción de prácticas culturales tendentes<sup>4</sup> a obtener el máximo rendimiento productivo con el menor desembolso económico posible. La preparación primaria del suelo (arado) debe permitir una profundidad suficiente para romper la suela de labor y proporcionar un buen desarrollo del sistema radicular y favorecer la infiltración de agua. Ha de procurarse una perfecta nivelación del terreno para facilitar el riego, especialmente cuando se cultive en llano y se riegue por inundación, sin que se generen encharcamientos, que son muy perjudiciales para esta planta.

---

<sup>4</sup> TENDENTES: Llevar ó practicar con un mismo fin una tradición cultural.

Como norma general es recomendable realizar una inoculación de las semillas con las bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico específicas de esta planta (*Bradyrhizobium japonicum* con  $1 \times 10^9$  UFC /ml de la cepa E109, *Azospirillum brasilense* con  $1 \times 10^9$  UFC/ml de la cepa AZ39) (Ferlini, 2005).

Estos productos se presentan generalmente en polvo negrozco y se utilizan de la siguiente manera: Se humedece la semilla con una pequeña cantidad de agua necesaria para la siembra y, una vez escurrida, se mezcla con la cantidad de polvos indicada por el proveedor. Se mejora la adherencia del inoculante a la semilla si se añade previamente al agua un poco de azúcar, melaza o goma arábica. Las bacterias son muy sensibles a la luz solar, por lo que conviene realizar la mezcla a la sombra y sembrar inmediatamente después de la inoculación (Ferlini, 2005).

La siembra generalmente se efectúa con máquinas sembradoras de leguminosas, de trigo, de maíz, de remolacha o de algodón, regulándolas convenientemente. También puede realizarse en lomos, con máquinas preparadas para dejar el terreno alomado<sup>5</sup> en la siembra, siempre que no quede la semilla muy profunda. Es importante que el terreno esté bien nivelado para obtener una siembra uniforme. Una mayor densidad facilitará el encamado de las plantas. Normalmente se emplea entre 140 y 160 kg de siembra por hectárea (ASA, 2008). El abono debe ser puesto al lado y por debajo de la semilla, pues el contacto directo perjudica la absorción de agua, pudiendo provocar la muerte de las plántulas durante su desarrollo inicial.

### **1.7.- Control de malas hierbas**

La soya es una planta poco agresiva y por lo tanto muy sensible a la competencia con las malas hierbas, durante las fases iniciales de su desarrollo. Las especies invasoras compiten por el agua, la luz y los elementos nutritivos, ocasionando posteriormente dificultades para la recolección mecánica del grano y perjudicando la calidad final del producto, algunas especies invasoras son las que se mencionan en la Tabla 2.

---

<sup>5</sup> ALOMADO: Forma arqueada hacia arriba.

Para el control de estas malas hierbas se emplean las siguientes técnicas:

- Control mecánico: Consiste en el empleo de aperos (arados, gradas, cultivadores, azadas, entre otros) antes de la siembra y de la floración.
- Control químico: Es el más empleado. Las materias activas más empleadas son trifluralina, etalfluralina, alacloro y linurón. Son sustancias de aplicación en presiembra, y que se emplearán según las indicaciones del fabricante. También se pueden realizar aplicaciones postsiembra, con una mezcla comercial de alacloro y linurón, disueltos en riego por aspersión (Ferlini, 2005).

Tabla. 2. Plagas que atacan a la soya (Pané, 2003).

Plaga	Característica
Pulgón ( <i>Aphis sp</i> )	Suele aparecer hacia el fin de la primavera, causando daños en las hojas y brotes. Es fácil de combatir con insecticidas sistémicos, como el dimetoato.
Arañuela o araña roja ( <i>Tetranychus bimaculatus</i> )	Ataca durante todo el verano, dando a las plantas un color característico y pudiendo llegar a defoliar toda la plantación si no se combate a tiempo. Los tratamientos repetidos con tetradifón + dicofol, son eficaces.
Gardama ( <i>Laphygma exigua</i> )	Las orugas de este lepidóptero suelen atacar en junio y julio, produciendo daños importantes en hojas. Se combate con productos a base de dipterex.
<i>Heliothis armigera</i>	Esta oruga ataca a las hojas tiernas, botones florales y vainas jóvenes. Se combate con productos a base de sevín o thiodán.
Rosquilla negra ( <i>Spodoptera littoralis</i> )	Esta oruga polífaga ataca a las hojas, provocando defoliaciones, también puede afectar a las vainas. Causa daños muy graves al final del verano. La rosquilla negra debe tratarse cuando es pequeña, ya que es más vulnerable.

### **1.8.- Enfermedades**

Las enfermedades más destacadas en la soya son algunas marchiteces causadas por hongos de los géneros *Fusarium*, *Verticillium* y *Rhizoctonia* y ciertos síntomas en las hojas causados por virus (Ferlini, 2005).

Los hongos del suelo atacan y destruyen las plantas de soya en sus primeros estadíos, antes o inmediatamente después de emerger, esto se observa cuando las plantas son aún pequeñas. Para la protección contra el ataque de los hongos se recomienda tratar la semilla con productos a base de thiram o captan. También, utilizar semilla de alto poder germinativo y sembrar con temperatura adecuada para una rápida germinación, lo que dificultará el ataque de los hongos. Las virosis más frecuentes son SMV (Soybean Mosaic Virus), BYV (Bean Yellow Virus) y TRSV (Tobacco Ringspoll Virus). La transmisión de estos virus se realiza por insectos o semillas infectadas (Ferlini, 2005).

### **1.9.- Recolección y Aprovechamiento**

La maduración se manifiesta por el cambio de color de las vainas, del verde al pardo más o menos oscuro. Esto se produce paulatinamente desde las vainas inferiores a las más altas, aunque con pocos días de diferencia. Al iniciarse la maduración las hojas comienzan a amarillear y se desprenden de la planta, quedando en ella únicamente las vainas. Cuando la semilla va madurando, su humedad decrece del 60 al 15% en un periodo de una o dos semanas (SAGARPA, 2008).

La soya puede recogerse con una cosechadora de cereales bien regulada, con unas pérdidas inferiores al 10%. El momento óptimo de recolección es cuando las plantas han llegado a su completa maduración, los tallos no están verdes y el grano está maduro con un porcentaje de humedad del 12-14%, es decir, cuando el 95% de las oleaginosas adquieren un color marrón. Si se retrasa la recolección se corre el riesgo de que las vainas se abran y se desgranen espontáneamente (SAGARPA, 2008).

Los rendimientos de la soya dependen de la variedad, el terreno, las atenciones de cultivo, el clima, entre otros. Normalmente se consiguen producciones medias de unos 4.000 kilos por hectárea.

Factores como la mala preparación del suelo, la siembra en época no adecuada, el uso de variedades no adaptadas, la presencia de malas hierbas, el retraso en la fecha de recolección, la elevada humedad de los granos y el equipo de cosecha en mal estado, pueden afectar negativamente los rendimientos finales de producción (ASA, 2008) & (SAGARPA, 2008).

Son muchos los aprovechamientos de esta planta, siendo los más importantes la obtención de proteínas, aceite, lecitina y forrajes. Se cultiva principalmente para la producción de semillas y la transformación de estas en harina proteica para la elaboración de piensos animales.

El aceite se utiliza para alimentación humana y para usos industriales (fabricación de margarinas, mantequillas, chocolates, confitería, entre otros).

#### **1.10.- Composición Química**

Las proteínas y los lípidos son los componentes que proporcionan mayor importancia y valor comercial a los frijoles de soya; representan en conjunto aproximadamente un 60%, el resto se divide entre carbohidratos y cenizas como se muestra a continuación en la Tabla 3.

Tabla. 3. Composición Química de la semilla de soya (Souci-Fachmann, 1999).

<b>Valor nutritivo de la semilla de soya</b>			
Contenido energético			
De los componentes digeribles	KJ	1.364	
De 100 g de porción comestible	Kcal	322	
Componentes principales de 100 g de porción comestible			
Agua	8.5 g	Hidratos de carbono	6.1 g*
Proteína	33.7 g	Fibra	15.5 g
Grasa	18.1 g	Sales minerales	4.7 g
Composición detallada de 100 g de porción comestible			
<b>Sales minerales</b>		<b>Aminoácidos</b>	
Sodio	4 mg	Arginina	2.360 mg
Potasio	1.740 mg	Histidina	830 mg
Magnesio	245 mg	Isoleucina	1.780 mg
Calcio	255 mg	Leucina	2.840 mg
Manganeso	3 mg	Lisina	1.900 mg
Hierro	8.590 µg	Metionina	580 mg
Cobre	110 µg	Fenilalanina	1.970 mg
Cinc	1 mg	Treonina	1.490 mg
Fósforo	590 mg	Triptófano	450 mg
Cloro	7 mg	Tirosina	1.250 mg
Yodo	6 µg	Valina	1.760 mg
Selenio	60 µg	<b>Hidratos de carbono</b>	
<b>Vitaminas</b>		Glucosa	5 mg
Carotenos	380 µg	Sacarosa	6.100 mg
Vit. E	1.500 µg	<b>Lípidos</b>	
Vit. K	40 mg	Ácido palmítico	1.580 mg
Vit. B <sub>1</sub>	990 µg	Ácido esteárico	590 mg
Vit. B <sub>2</sub>	520 µg	Ácido oléico	3.790 mg
Nicotinamida	2.510 µg	Ácido linoléico	8.650 mg
Ácido pantoténico	1.920 µg	Ácido linolénico	1.000 mg
Vit. B <sub>6</sub>	1.190 µg	<b>Otros componentes</b>	
Biotina	60 µg	Purinas	380 mg
Ácido fólico	230 µg	* No se han considerado los oligosacáridos (rafinosa, estaquiosa) no utilizables.	

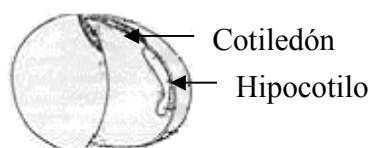
Los frijoles de soya comerciales contribuyen aproximadamente en un 8% de cáscara o tegumento, 90% de cotiledón, y 2% de hipocotilo, como se observa en la Figura 2. Las proteínas, se encuentran casi totalmente localizadas en los cotiledones (Tabla 4).

Tabla. 4. Composición media de la semilla seca de soya y de sus partes (Planeta soja,2008).

	<b>Semilla entera</b> <b>(%)</b>	<b>Cotiledones</b> <b>(%)</b>	<b>Cascarilla</b> <b>(%)</b>	<b>Hipocotilo</b> <b>(%)</b>
Peso	100	90	8	2
Proteínas (N x 6.25)	40	43	9	41
Grasas	21	23	1	11
CHOS	34	29	86	43
Cenizas	4.9	5.0	4.3	4.4



Figura. 2. Partes fisiológicas del frijol de soya (ASA, 2008).



Las proteínas casi totalmente localizadas en los cotiledones se caracteriza por una proporción satisfactoria entre los aminoácidos esenciales a pesar de que casi escasean metionina y cisteina, por otra parte, su elevado contenido en lisina con relación a otras plantas cultivadas hace que la soya sea especialmente importante para incrementar el valor nutritivo de las mezclas alimenticias.



### **1.11.- Aspectos nutrimentales y de salud del fríjol de soya**

La industrialización de los frijoles de soya ha permitido ampliar su uso de manera muy efectiva. La obtención de aceite y la de una gran variedad de derivados de las hojuelas de soya desgrasadas tales como los concentrados, texturizados y aislados proteicos, forman los ejemplos más claros del uso de la soya en la industria de los alimentos.

Su importancia reside, entre otras características, en:

- Su elevado porcentaje de aceite
- Sus propiedades alimenticias por el elevado contenido en proteínas
- La obtención de los germinados para la alimentación
- La producción de harinas de soya
- Aplicación en la Industria cárnica

Si bien se ha visto que la soya es un alimento muy versátil y con ella se pueden preparar a niveles tradicionales e industriales diversos productos, se ha demostrado que aporta varios beneficios a la salud humana y que de ahí se propague el consumo y la ingesta en la dieta. La soya tiene un alto contenido en proteínas, éstas son similares a las de la carne o la leche por lo que este producto consecuentemente es una alternativa a la proteína animal, libre totalmente de grasa y colesterol (Industrial de Alimentos, 2007).

Sin embargo tres son las causas que hacen que no se consuma demasiado el fríjol de soya:

- Es de difícil cocción
- No es muy sabroso al natural
- Provoca flatulencia

Para dar solución a la primera de las razones, el frijol de soya se deja en remojo durante la noche. Para la segunda, se realizan diferentes formulaciones para este alimento y que resulte agradable al paladar y nutritivo a la vez. De aquí la importancia de ampliar la industrialización de esta oleaginosa. Existe en la soya un inhibidor de la tripsina que es una enzima pancreática que actúa en la digestión de las proteínas, el problema se remedia dejando los frijoles de soya en remojo por un periodo de 12 a 14 horas para solubilizar la proteína o darle un tratamiento

térmico con temperaturas superiores a los 80 °C por un periodo de tiempo corto. En cuanto a la flatulencia, es debida a los hidratos de carbono, rafinosa y estaquiosa que se encuentran predominantemente en la cáscara; por ello se recomienda el descascarado que se logra con el tratamiento térmico antes mencionado (Industrial de Alimentos, 2007).

### **1.11.1.- La alergia a la soya**

La alergia a la soya es más común en los bebés. La edad media en la cual la alergia se manifiesta es a los tres meses, sin embargo la mayoría de los bebés ya no la presentan a los dos años. Aunque los adultos también sufren alergia a la soya, estos casos son raros (Rosenstein, 2005).

Hay muchos síntomas de la alergia a la soya, y pueden incluir:

- El acné y otras condiciones de la piel, como el eczema
- Hinchazón
- Congestión nasal
- Anafilaxis
- Úlceras de la boca o ampollas de fiebre
- Colitis y otros problemas gastrointestinales, incluyendo la diarrea
- Conjuntivitis
- Falta de aire
- Fiebre, fatiga, debilidad, y nauseas
- Presión sanguínea baja
- Urticaria

Pero también el consumo de productos de soya ha sido relacionado con muchos beneficios a la salud, algunos son:

- Protege contra el cáncer de mama, próstata y colon.
- Reduce los síntomas de la menopausia.
- Disminuye los riesgos de enfermedades cardíacas.
- Disminuye los riesgos de enfermedades de la osteoporosis.
- Ayuda a prevenir y reducir los efectos del Alzheimer.
- Reduce el colesterol.

Muchos de estos beneficios provienen de los fitoestrogenos<sup>6</sup>, grupo al que pertenecen las isoflavonas que actúan como hormonas mitigando la actividad estrogénica en las mujeres, el ácido graso docosahexaenoico (DHA) presente en la soya reduce el impacto del AB42 que es la toxina del mal del Alzheimer (Rosenstein, 2005).

La soya es una oleaginosa especialmente rica en potasio y fósforo, además de calcio, hierro, magnesio y cobre, contiene vitaminas A, B, C y D, así como enzimas estimulantes de la función digestiva.

---

<sup>6</sup> FITOESTROGENOS: Son compuestos químicos no esteroideos, que se encuentran en los vegetales pero son similares a los estrógenos humanos, y con acción similar (efecto estrogénico) u opuesta (efecto antiestrogénico) a éstos.

## **2.- EQUIPOS DE EXTRUSIÓN**

### **2.1.- Definición de extrusión**

La palabra extrusión proviene del latín "extrudere" que significa dar forma a un material (plástico, metálico ó alimenticio) haciéndolo salir por una abertura especialmente dispuesta (Reverter, 2006).

A continuación se da una definición práctica:

"La extrusión de alimentos es un proceso en el que un material (grano, harina o subproducto) es forzado a fluir, bajo una o más de una variedad de condiciones de mezclado, calentamiento y cizallamiento, a través de un dado diseñado para dar forma o expandir los ingredientes"(Millar, 2006).

### **2.2.- Aspectos históricos de la extrusión**

- Los procesos de extrusión y los equipos de extrudidos fueron desarrollados simultáneamente en varias industrias y países durante los dos últimos siglos.
- En 1779 ya se empleaba un sistema manual para el procesado de pasta.
- En 1860-1863 aparecen las primeras producciones industriales de cereales para desayuno en Michigan y Nueva York.
- En 1869 Fellows y Baste, en Inglaterra desarrollaron el primer extrusor continuo de doble husillo conocido. Este equipo se usó inicialmente para la elaboración de productos tipo salchicha.
- En 1894 Will Keith Kellog inventa los primeros "corn flakes" que empezaron a comercializarse de forma generalizada a partir de 1906.
- En 1900-1902, se utilizó la primera prensa-extrusora en continuo para la obtención de aceite de linaza.
- En 1930 se desarrolló el primer extrusor de husillo único para la producción continua de pasta. Desde el siglo XIII que se introdujo en Europa se realizaba por cargas, pero a pesar de ello, hasta 1940 aún se producía la pasta de forma generalizada mediante sistemas por cargas.

- En 1939 los primeros rizos de maíz fueron extrudidos. Este producto no fue lanzado al mercado hasta después de la II Guerra Mundial por Adams Corporation.
- A lo largo de 1940 se desarrollaron y refinaron diferentes extrusores de único tornillo para la obtención de aceite a partir de semillas oleaginosas, sustituyendo muchas de las menos eficientes prensas hidráulicas obtenidas para este propósito.
- En 1950, la primera máquina de extrudido de comida para animales fue puesta en marcha por Ralston Purina.
- Entre 1950 y 1960 se desarrollan las primeras instalaciones de comida extrudida para animales, basada en almidón gelatinizado.
- En 1951 Anderson Company desarrolla un sistema de pre-prensado de semillas oleaginosas de alto contenido en aceite para posterior extracción con disolventes.
- Entre 1960 y 1970 aparecen los primeros sistemas de cocción y conformado en continuo para la obtención de cereales, pet foods de humedad intermedia, cereales basados en almidón pregelatinizado, TPP (texturized plant proteins) y sistemas para la inactivación de inhibidores del crecimiento, enzimas, etc.
- En 1970 nuevas generaciones de extrusores de simple y doble tornillo se hicieron presentes en el mercado.
- Extrusores de doble tornillo se fabricaban en Europa desde hace más de 35 años, pero sólo a partir de los 80s, se interesan las empresas de USA.
- A partir de la década de los ochenta, se hace extensa la proliferación del uso de los extrusores.

Como proceso industrial, la extrusión consiste en la utilización de un flujo continuo de materias primas para la obtención de productos, generalmente metalúrgicos, plásticos y alimenticios. Las materias primas se someten a fusión, transporte, presión y deformación para así obtener el producto deseado. Es un proceso que combina diferentes operaciones unitarias y mecánicas como el mezclado, el amasado, la cocción, y el moldeo por mencionar algunas. La extrusión es un proceso a humedad relativamente baja comparado con métodos convencionales, por lo que se facilita la transformación de las materias primas en fluidos, por ejemplo, la cocción por extrusión es llevada a cabo a temperaturas altas alrededor de 100 a 180°C por periodos de tiempo cortos que van de 30 a 120 segundos, así

la masa acuosa se sobrecalienta y el vapor de agua que está contenido en el extrusor es a presión elevada (Ghebre, 2004).

Sus funciones de proceso pueden incluir, dependiendo de la configuración del equipo extrusor (Guy, 2002):

- Aglomeración: Para que los ingredientes o componentes de una fórmula se compacten en trozos distintos.
- Desgasificado: Para eliminar la cantidad de gas contenida en algunos de los ingredientes de la fórmula y que puedan perjudicar al producto final.
- Expansión: Se puede controlar la densidad (flotación o hundimiento) del producto mediante las condiciones y/o la configuración del extrusor.
- Trituración: Se da en la parte del cilindro del extrusor.
- Homogeneización: Se da mediante la incorporación de los ingredientes debido al movimiento del cilindro y los tornillos en el extrusor.
- Mezclado: Esta acción se da mediante el cilindro y a su gran diversidad de tornillos.
- Pasteurización y Esterilización: Debido a las altas temperaturas y tiempos cortos con los que se maneja el equipo.
- Desnaturalización de proteínas: Se origina por la cocción en la extrusión.
- Moldeado: Se puede realizar cualquier forma deseada al producto con el cambio del dado o troquel al final del cilindro del extrusor.
- Cizallamiento: Con una configuración especial dentro del cilindro del extrusor se puede crear esta acción en determinados productos.
- Alteración de la textura: Se puede alterar física o químicamente y dar apariencia al producto terminado.
- Cocción térmica: Con las temperaturas de operación se puede conseguir el efecto de cocción deseado según el producto final.
- Unificación: Diferentes ingredientes se pueden combinar dentro de un producto para obtener características especiales.

### **2.3.- Ventajas del proceso de extrusión**

- Flexibilidad de operación, permitiendo la obtención de una gran diversidad de productos.
- Posibilidad de procesamiento en diversas formulaciones, permitiendo adecuar el nivel nutricional según las necesidades requeridas.
- Bajo costo de procesamiento.
- Tecnología simple.
- Mínimo deterioro de nutrientes de los alimentos en el proceso.
- Eficiente utilización de la energía.
- Ausencia de efluentes.
- Inactivación de enzimas y factores antinutricionales.
- Producción de alimentos inocuos.

Durante la extrusión en caliente de los alimentos almidonosos o proteínicos, la humedad se incrementa, debido a que los gránulos de almidón absorben agua, se hinchan y gelatinizan, ya que con este fenómeno se requiere, para que suceda, una temperatura superior y lograr la disrupción de las moléculas en los gránulos. En cuanto a los alimentos proteicos (harina de soya y semillas oleaginosas desgrasadas) la estructura cuaternaria de las proteínas cambia por la humedad y las elevadas temperaturas, dando lugar a una masa húmeda y viscosa (Fellows, 1994). Las moléculas de proteína se polimerizan, se establecen enlaces intermoleculares y se reorientan, obteniendo así la clásica textura fibrosa de las proteínas vegetales texturizadas (Kearns, 2006) & (Badui, 1993). Por las razones anteriores la extrusión ha ganado popularidad debido a su versatilidad en donde se puede hacer una amplia gama de productos, se puede establecer diferentes formulaciones, así como las condiciones de operación. Su costo es bajo y su productividad es alta en comparación con otros procesos de cocción y formado; en cuanto a la productividad, su modo de operación es continuo, lo que en muchas ocasiones se busca y por lo tanto se obtienen grandes rendimientos. En materia de calidad, por su operación en altas temperaturas y tiempos cortos, muchos componentes sensibles no se pierden con facilidad, por lo tanto se puede eliminar la posibilidad de enriquecerlos ó adicionarlos, lo que generaría un costo mayor.

## 2.4.- Aplicaciones de la extrusión

Los productos extrudidos que se obtienen para la alimentación humana son:

- Cereales de desayuno listos para comer
- Snacks (aperitivos salados y dulces)
- Alimentos para bebés
- Sopas instantáneas
- Coberturas
- Proteína vegetal texturizada (ver Figura 3)
- Sustitutos de carne
- Harinas compuestas y enriquecidas
- Sustitutos lácteos
- Aditivos de panificación
- Almidones modificados
- Productos de confitería
- Pastas
- Bebidas en polvo
- Ingredientes para sopas
- Galletas
- Productos dietéticos
- Cereales, oleaginosas y legumbres precocidas
- Ingredientes para alimentos balanceados
- Sabores Maillard
- Nutraceuticos

Los productos extrudidos que se pueden obtener para la alimentación animal son:

- Alimentos para rumiantes, cerdos, aves, peces, entre otros.
- Procesamiento de subproductos o desechos de la industria alimentaria:
  - Residuos de la industria de la pesca
  - Residuos de la industria de aves, cerdos y vacunos
  - Residuos de la industria de lácteos, panificación y frutas





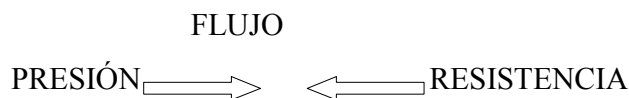
Figura. 3. Texturizados a base de soya (Kearns, 2006).

#### 2.4.1.- Otras aplicaciones

- Industria del papel
- Industria textil
- Fundiciones metalúrgicas
- Adhesivos y agentes ligantes
- Coadyuvantes de insecticidas y fungicidas

#### 2.5.- Mecanismo de transformación en el proceso de extrusión

El proceso fundamental de extrusión consiste en un aparato generador de presión, el cual causa que el producto se mueva como un líquido en un flujo laminar a través de una resistencia. Estos dos componentes, flujo y resistencia, determinan el proceso de extrusión y el tipo de producto que se requiere (Brennan, 2000).



La presión y el flujo pueden ser causados por un número de mecanismos, incluyendo pistones y rodillos. Aunque éstos son utilizados en muchos casos, el uso de tornillos es más importante. Los tornillos no sólo movilizan el producto hacia adelante, generando presión, sino que también mezclan el producto, ayudando a la generación y transferencia de calor, a la texturización y homogeneización. El producto contenido en el canal de un tornillo rotatorio es cizallado, esto significa que se adhiere a dos superficies diferentes (tornillo y cilindro) que se mueven respecto a cada uno.

La velocidad del producto en el canal varía de cero (en el cilindro) a un máximo en la superficie del tornillo. En este gradiente de velocidad, las capas del producto se deslizan unas sobre otras. A esto se le llama cizallamiento, un factor muy importante en extrusión (Guy, 2002).

El cizallamiento es proporcional a la velocidad y diámetro del tornillo. El cizallamiento, como se ve en la Figura 4, hace que un producto se estire, acelera la gelatinización de almidones y otras reacciones, alinea moléculas de cadena larga y puede depolimerizarlas causando dextrinización (Miller, 2006).

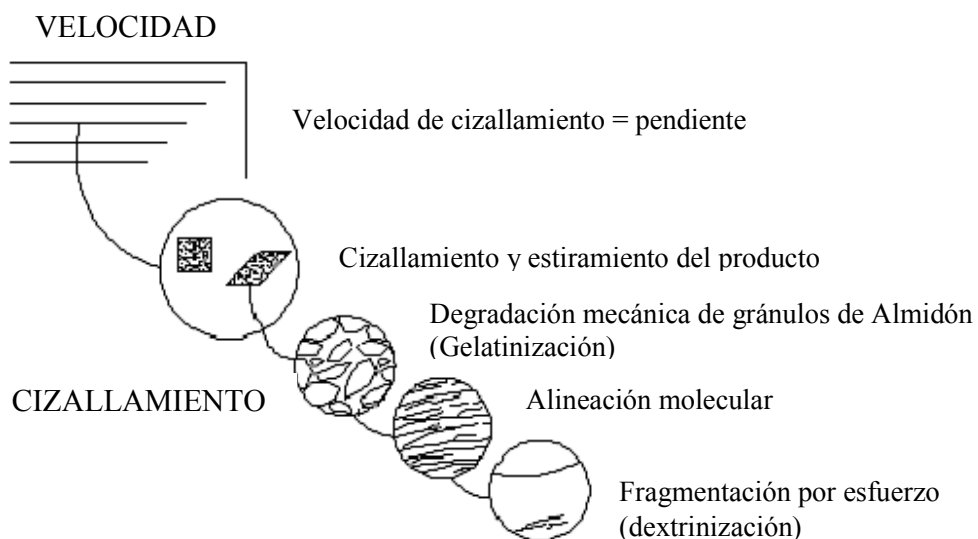


Figura. 4. Esquema de cizallamiento dentro de un extrusor (Miller, 2006).

Cuando se utilizan para cocción, los extrusores deben tener una fuente externa del calor y transferirlo hacia el producto. Esto puede ser obtenido en varias formas, como se muestra en la Figura 5, por conversión de energía mecánica (rotación del tornillo), aplicación de calor externo, y/o por inyección de vapor ya sea dentro o antes del extrusor.

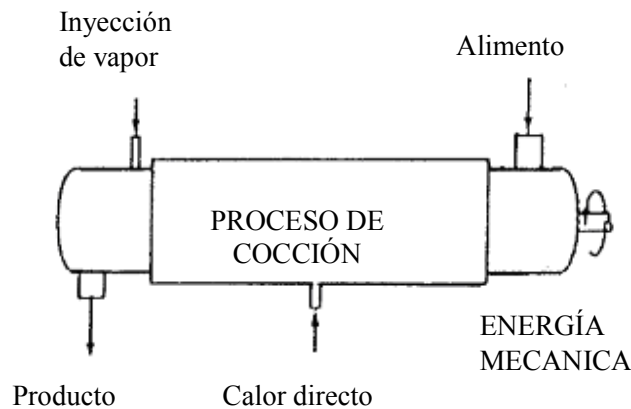


Figura. 5. Esquema de las diferentes formas de calor ocurridas en un extrusor (Miller, 2006).

La energía es consumida por reacciones endotérmicas como la gelatinización de los almidones o desnaturalización de las proteínas, y por aumento de temperatura del producto, la energía mecánica es generada por el cizallamiento, los productos alimenticios trabajados por extrusión son muy viscosos, ellos resisten a la cizalla generando fuerzas de fricción entre las capas en movimiento del producto; para sobrepasar estas fuerzas se requiere energía la cual se convierte en calor en el producto (Reverter, 2006).

## 2.6.- Transferencia de calor en el proceso de extrusión

La transmisión de calor debe ser abordada en dos niveles:

- Considerando al extrusor en forma global: Se cuantifican los niveles de energía mecánica y térmica en todo el equipo: calentamiento, enfriamiento, pérdidas y cambios de la energía interna del material (Guy, 2002).
- De manera local considerando solo al cilindro: En donde la transmisión de calor se analiza en cada zona del extrusor: transporte del sólido, la presurización, la fusión, el mezclado y/o el cizallamiento, transporte del fundido y el dado (Guy, 2002).

### 2.6.1.- Consideraciones para el balance térmico global en el extrusor

Se considera el consumo de energía del proceso y se cuantifica la energía transmitida al material. Se consideran los siguientes valores de potencia:

- Potencia mecánica por el motor:  $P_{\text{mecánica}}$
- Potencia térmica suministrada por el sistema de calentamiento:  $P_{\text{calentamiento}}$
- Potencia térmica absorbida por el circuito de enfriamiento:  $P_{\text{enfriamiento}}$
- Pérdidas térmicas al ambiente:  $P_{\text{pérdidas}}$
- Potencia absorbida por el material:  $P_{\text{material}}$

El balance (en unidades de Watt) se describe como:

$$P_{\text{mecánica}} + P_{\text{calentamiento}} = P_{\text{enfriamiento}} + P_{\text{pérdidas}} + P_{\text{material}}$$

Esto representa la cantidad de calor necesario para transformar el material, que es equivalente al cambio en su entalpía (energía interna del producto dependiendo del estado del mismo y del cambio de fase), a medida que pasa a través del extrusor (calor sensible y entalpía de fusión) (Guy, 2002) & (Mc Cabe, 2000).

### 2.6.2.- Consideraciones para los balances de materia y energía

Los siguientes puntos son básicos para los cálculos de materia y energía en un sistema de extrusión y poder escalar de un sistema piloto a un proceso de mayor capacidad (Sharma, 2003).

#### A. Balance de materia:

1. Calcular el caudal másico total en puntos específicos del sistema.
2. Calcular el contenido de humedad, contenido graso u otro contenido de componentes en un punto específico del sistema.
3. Calcular las necesidades de flujo de las corrientes de entrada para alcanzar un contenido específico de un componente.
4. Calcular las necesidades de caudal másico para un cambio de escala del sistema, de una prueba piloto a un proceso mayor.

### ***B. Balance de energía:***

1. Calcular el contenido energético del producto en un punto específico del sistema.
2. Calcular la temperatura del producto en un punto específico del sistema.
3. Calcular las necesidades o consumos energéticos del proceso, esto incluye lo siguiente:
  - Pre-acondicionador
  - Cilindro del extrusor
  - Sistema de recubrimiento

### **2.7.- Zonas de proceso en el extrusor**

**A. Zona de Alimentación:** Asegura el paso del material hacia el extrusor, se puede disponer de sistemas de calefacción y/o secado para materiales higroscópicos.

Las tolvas o depósitos son una parte integral de un dispositivo de alimentación y se utilizan para mantener los ingredientes secos antes de ser introducidos al pre-acondicionador. La porción seca de la alimentación se entrega al sistema de extrusión a través de un dispositivo de medida especializado capaz de proporcionar un flujo uniforme y cualquier velocidad de extrusión deseada. Existen varios dispositivos de alimentación.

- De medición volumétrica: Se utilizan barrenas o transportadores de tornillo de velocidad variable.
- Alimentación de pérdida de peso (gravimétricos): Con un ensamblaje depósito/alimentador se colocan en celdas de carga.
- Tipo vibratorio: Tiene frecuencia variable o pulsante y también se pueden utilizar como dispositivos gravimétricos.
- Tanques de lechada y dispositivos (bombas) de alimentación: Se utilizan para conseguir una medición uniforme de ingredientes líquidos. (Ghebre, 2004)

Los sistemas gravimétricos son los más utilizados en la producción de proteína vegetal texturizada, aunque esto implique un costo mas elevado, pero se prefieren debido a que no influyen en los cambios de la densidad de la materia prima a la altura del producto en el depósito conectado.

Existen varias configuraciones de tolvas para la alimentación de la materia prima, dentro de estas se puede observar según las Figuras 6 y 7 que presentan un tornillo sinfín, su principal función es el transporte del material hacia el pre-acondicionador para obtener proteína texturizada o directamente al equipo extrusor para otros productos.

- LBM (*live bin mixer*) Consta de un alimentador de velocidad variable y un cilindro con doble agitador mezclador, especialmente para productos harinosos ó granulados (Ghebre, 2004).

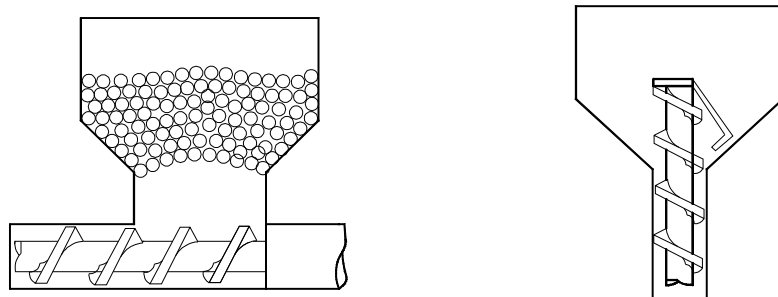


Figura. 6. Tolvas con grados de inclinación diferentes para productos harinosos (Ghebre, 2004).

- LB (*live bin*) Se utiliza cuando existe una alimentación forzada y para materiales con fluidez muy lenta o mezclas de componentes diferentes como se observa en la Figura 7, el transporte se hace mediante vibración y del movimiento del tornillo. Ó para materiales de flujo libre sin la necesidad de la vibración (Ghebre, 2004).

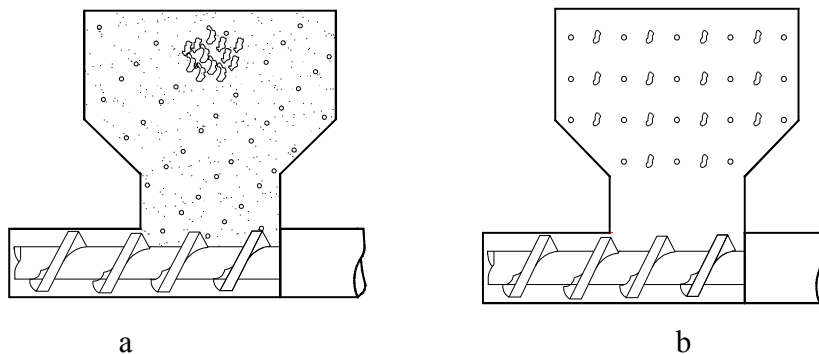


Figura. 7. (a) Tolva con vibración (b) Tolva para materiales de fluidez lenta (Ghebre, 2004).

En la Figura 8 se observa la sección donde se alimenta y da el transporte del material sin la incorporación de un pre-acondicionador, el material crudo de baja densidad global se precalienta por el rozamiento entre el mismo material, además se puede utilizar como mezclador en caso de que se adicionen otros ingredientes.

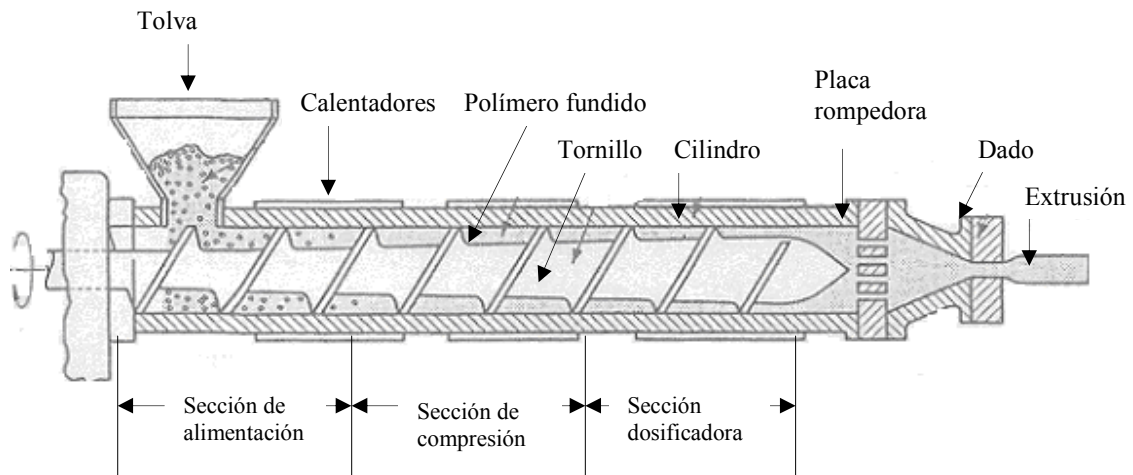


Figura. 8. Esquema de una extrusora y las zonas de proceso (Pané, 2003).

Para el caso de producción de soya texturizada, la incorporación al equipo extrusor de un pre-acondicionador es vital, debido a que la harina de soya desgrasada necesita ser acondicionada en humedad antes de ser introducida al cilindro, en la zona de alimentación las partículas de baja densidad previamente preacondicionadas se introducen en el interior del cilindro (esto se describirá a continuación en la zona de pre-acondicionamiento). El canal de flujo del tornillo en esta zona está relativamente lleno con la materia prima, la razón de la baja densidad es debido a la cantidad de aire atrapado en el material; a medida que éste es transportado hacia la salida del extrusor es comprimido levemente mientras el aire está siendo expulsado. El agua es inyectada en la zona de alimentación del cilindro para alterar el desarrollo textural y viscosidad e incrementar la transferencia de calor, las regiones de presión están diseñadas estratégicamente en la configuración del cilindro para prevenir el flujo en contracorriente de los vapores hacia atrás en la entrada de extrusor y para maximizar la utilización de energía del vapor, el extrudido se mueve a través de la zona de amasado, comienza a formarse una pasta fluida y se alcanza la máxima compactación entre los sólidos, esto se describirá en la zona de amasado.

**B. Pre-acondicionador:** Se utiliza para realizar una mezcla perfecta o para la adición de humedad y temperatura con vapor o agua caliente como se muestra en la Figura 9, así se eleva la temperatura y el contenido de humedad en el material contribuyendo así a la cocción del mismo. Se necesitan tiempos de retención largos para permitir que los procesos de difusión y transmisión de calor transporten la humedad y la energía desde la superficie al interior de la partícula.

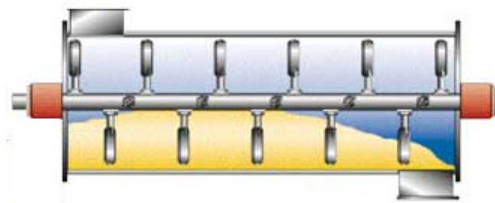


Figura. 9. Pre-acondicionador con sistema de alimentación (Millar, 2006).

El tornillo de alimentación hace pasar la materia prima al pre-acondicionador directamente, se utiliza para pre-mezclar el vapor y el agua con los ingredientes secos, (ver Figura 10). Esta mezcla se detiene en el cilindro del pre-acondicionador el tiempo suficiente (ya que es imperativo para todas las reacciones químicas o físicas), para que cada partícula consiga la temperatura y humedad de equilibrio.

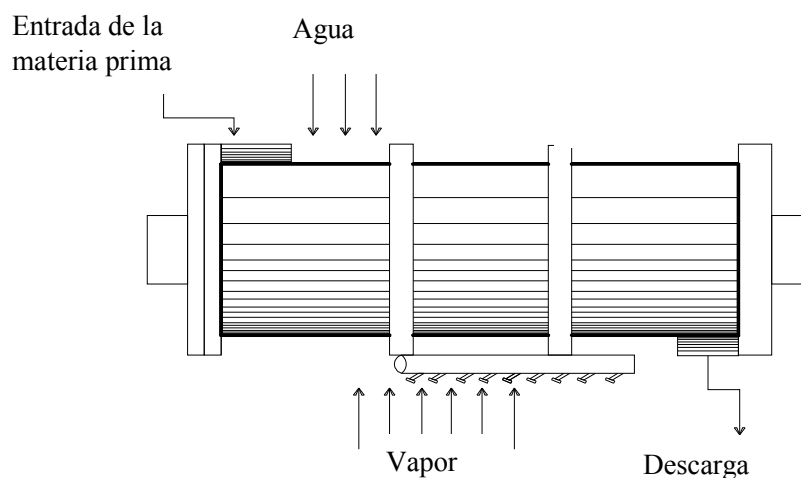


Figura.10. Materiales de alimentación hacia el pre-acondicionador (Millar, 2006).



Básicamente existen dos tipos de pre-acondicionadores continuos:

- Pre-acondicionadores presurizados:

Dan tiempos de residencia entre 1 a 3 minutos a temperaturas hasta de 115°C, estos equipos no son buenos para dar calidad nutritiva al producto además de que su diseño y proceso de operación es mas complicado (Callejo, 2002).

- Pre-acondicionadores atmosféricos:

Tienen un tiempo de residencia de 20 a 240 segundos, la formulación es precalentada y la humedad penetra en las partículas individuales.

Este tipo de pre-acondicionador ayuda al desarrollo del sabor y textura del producto final, además de que ayuda a reducir el desgaste de los componentes del extrusor (Callejo, 2002).

El material pre-acondicionado entra al interior del cilindro del extrusor con una cierta densidad; el roscado del tornillo de entrada usualmente es muy profundo y tiene un paso de rosca con perfiles de roscado que casi son verticales para maximizar el transporte. A medida que el material es transportado dentro de la zona de amasado, su densidad puede aumentar debido al agua y vapor añadidos, así la inclinación del tornillo disminuye y el ángulo también disminuye para lograr mejor mezclado, como se muestra en la Figura 11.

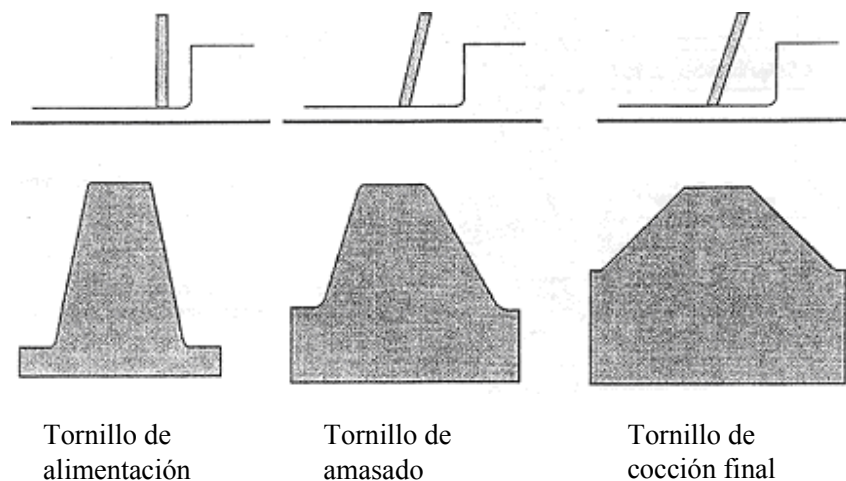


Figura. 11. Perfiles de la rosca del tornillo (Riaz, 2004).

*C. Zona de amasado:* La materia prima pierde su textura y su densidad, empieza a aumentar conforme lo hace la presión en el interior del cilindro, se calienta por medio de vapor y es transportada por el tornillo; el diámetro del tornillo va disminuyendo progresivamente hacia la salida para compactar el material y expulsar el aire atrapado hacia la zona de alimentación.

Los canales de flujo del extrusor consiguen un grado mas alto de llenado a medida que su volumen y grado de inclinación del tornillo disminuyen, la densidad del extrudido empieza a aumentar y se desarrolla presión en el cilindro.

Las partículas empiezan a aglomerarse debido a la temperatura en aumento que resulta de la conducción dentro del cilindro de la inyección directa de vapor y de la disipación de energía resultante de la fricción, es decir, mientras se aumenta la presión el fenómeno ocurrente es la compresión del material mientras es transportado hacia delante formando la masa fluida, la temperatura aumenta debido a las diferentes formas de transmisión de calor ocurridas dentro del cilindro en el extrusor, en la entrada al momento de estar pasando el material el rozamiento produce calor por conducción entre el material y las paredes del cilindro, a la mitad del proceso debido a la inyección de vapor, el calor se transmite por convección hacia el material y al final, cuando esta pasando la masa fluida por el dado el calor se genera por conducción y al mismo tiempo ocurre la evaporación de agua del material lo que igualmente se traduce en calor, estos fenómenos se muestran esquemáticamente en la Figura 12.

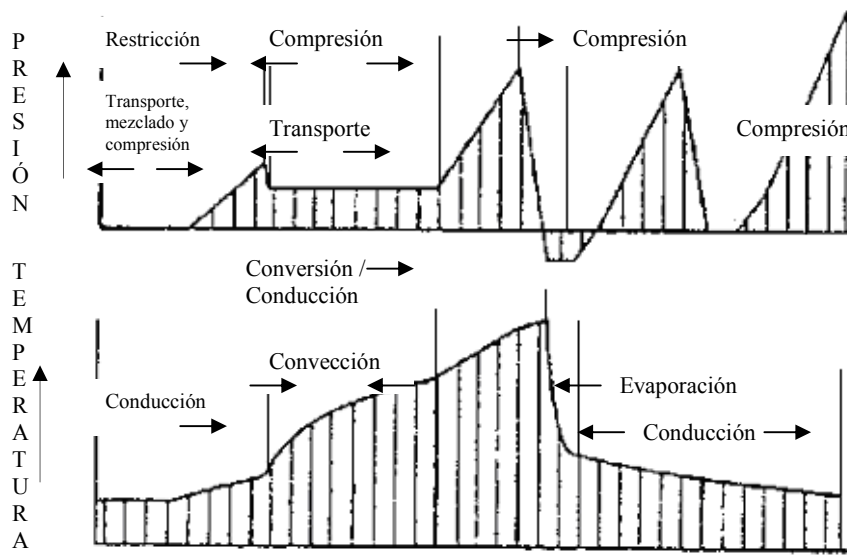
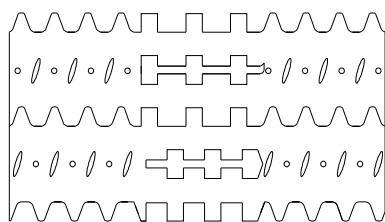
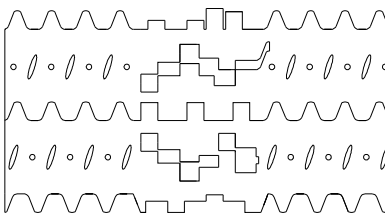


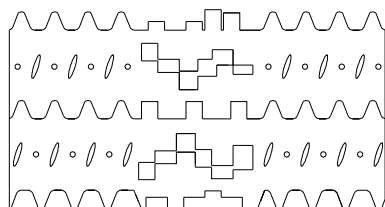
Figura. 12. Gráfica de las zonas de procesado en extrusión (Millar, 2006).



Elementos de amasado con grado de inclinación hacia delante.



Elementos de amasado con grado de inclinación inverso.



Elementos de amasado con grado de inclinación neutro.

Figura. 13. Orientación del elemento de amasado (Riaz, 2004).

Los elementos de cizallamiento/amasado (cierres de amasado) en forma de lóbulo se pueden ensamblar en forma neutra, o para ayudar o rechazar el transporte hacia delante del extrudido. Los elementos de cierre de cizalla configurados en una forma neutra mezclan y amasan el extrudido mientras son dependientes de los elementos del tornillo; se configuran para ayudar al transporte hacia delante proporcionando más mezclado y amasado. Cuando se configuran para rechazar el transporte hacia delante, los elementos lobulados proporcionan el amasado y el mezclado mientras tienden a bombear más extrudido hacia la entrada que hacia el dado, ver Figura 13. El tornillo del extrusor inmediatamente debe impulsar el extrudido a través de este conjunto de cierre de cizalla (Pané, 2003).

El deslizamiento reducido en la pared del cilindro previene al material alimentario que cambie de dirección con el tornillo, esto se observa en la Figura 14. Un canal continuo del tornillo sirve como paso para el flujo inducido por la presión, así que la presión detrás del dado es mas alta que en la entrada. También tiene lugar el flujo de fuga, en el espacio libre entre la punta del tornillo y la pared del cilindro. La rosca del tornillo se puede interrumpir en ésta área para aumentar más el mezclado mediante el flujo de fuga (Riaz, 2004).

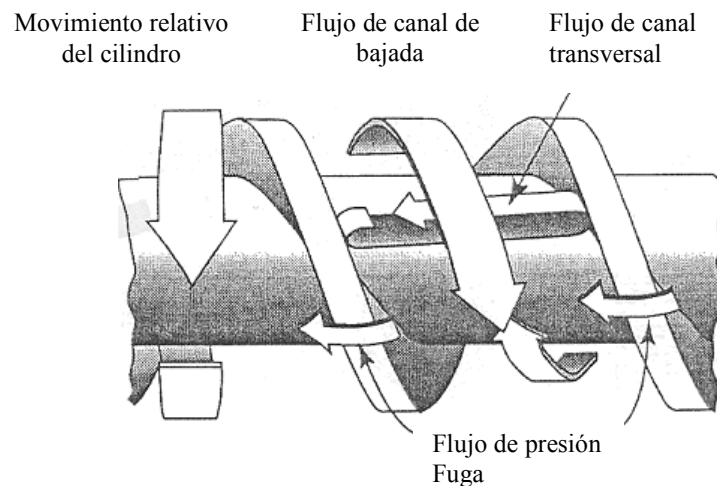


Figura. 14. Componentes del flujo de los tornillos en extrusión (Riaz, 2004).

Las paredes lisas de los cilindros de los extrusores, como se muestra en la Figura 15, no son deseables en las aplicaciones de la extrusión de alimentos debido a la naturaleza adhesiva durante la cocción; para asegurar que tiene lugar este deslizamiento la pared del cilindro debe ser estriada. Las estriás tienen como objetivo el reducir o evitar el deslizamiento y aumentar la producción.

Las estriás longitudinales, ver Figura 15, permiten un flujo de fuga más grande a través de la parte superior de la rosca del tornillo. Los cilindros con estriás espirales también aumentan el flujo de fuga debido a su dirección helicoidal, así el material es transportado hacia delante. Las secciones estriadas rectas del cilindro pueden aumentar la cocción del extrudido especialmente si se utiliza cuando el cilindro está lleno con material (Riaz, 2004).

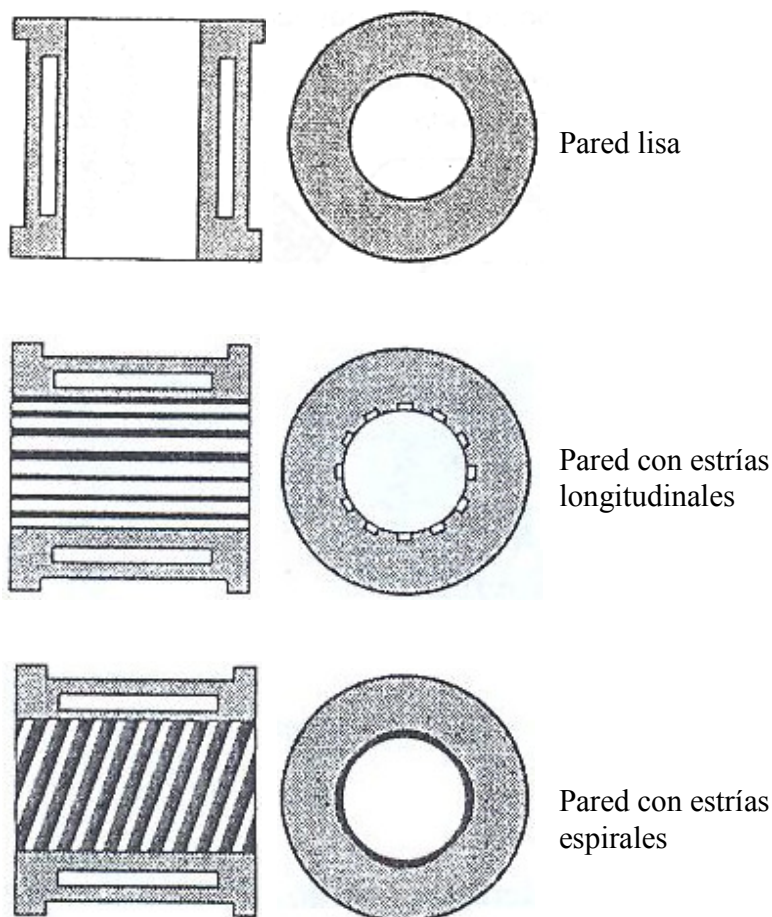


Figura. 15. Configuraciones típicas de las paredes del cilindro de los extrusores (Riaz, 2004).

*D. Zona de cocimiento final:* Esta es el área donde se da la formación del tamaño amorfo y/o la texturización, la temperatura y la presión aumentan rápidamente, las velocidades de deformación son más altas debido a la configuración del tornillo y la compresión máxima del extrudido.

En la zona de cocción se da la formación del tamaño y/o texturización. Las velocidades de deformación son más altas debido a la configuración del tornillo del extrusor y la compresión máxima del extrudido, la presión, temperatura y la viscosidad resultante del fluido son tales que el extrudido será expulsado por el dado del extrusor para dar la textura, densidad, color y propiedades funcionales deseadas al producto final.

La densidad aumenta a medida que la combinación de las entradas de energía térmica y mecánica plastifica al material por encima de su temperatura de fusión de transición. La rosca del tornillo en la zona final de cocción es típicamente poco profunda, tiene un grado de inclinación corto, y tiene perfiles de rosca que son relativamente planos para aumentar el flujo de fuga y disminuir la capacidad de transporte, como se muestra en la Figura 11.

*E. Dado:* Aquí se forma la masa, el material se comprime hacia el troquel, dado o matriz, se mantiene por unos segundos y después es forzado a salir para obtener diferentes formas en el producto. El dado de extrusión sirve principalmente como una resistencia al flujo. Tiene una profunda influencia en el paso del flujo del producto en el tornillo, y también contribuye directamente a la texturización del producto por el cizallamiento desarrollado en el dado.

Como en el canal del tornillo, el producto pasa a través del dado con flujo laminar en donde, en la mayoría de los casos, se adhiere a las superficies del dado, por lo tanto, existe un gradiente de velocidad, en donde la velocidad es máxima en el centro del flujo, y desciende a cero en la superficie. La resistencia al flujo es una función de la viscosidad (resistiendo el cizallamiento). Esto, a su vez, es una función de velocidad y geometría del dado, entre más pequeños sean los orificios de los dados, crean mayor cizalla y más resistencia en el producto (Rokey, 2005).

## 2.8.- Elementos Cónicos

Los elementos cónicos finales del tornillo añadido a la descarga de cocción del tornillo eliminan la necesidad de adaptadores complicados al dado. El gradiente de presión circunferencial disminuye desde un máximo a la entrada final del elemento cónico hasta cero cerca de donde los tornillos pierden la comunicación radial, ver Figura 16. No existe un gradiente de presión circunferencial desde este punto al final del tornillo. El volumen de su entrada a la descarga está significativamente reducido. Esto da como resultado una compresión rápida del extrudido y un aumento de la presión del cilindro (Reverter, 2006).

Los elementos cónicos finales también fuerzan a un máximo de presión y densidad del extrudido justo en el interior del dado al final.

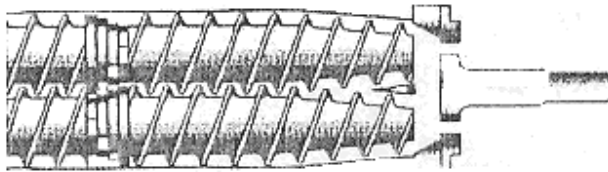


Figura. 16. Extrusor de doble tornillo con elementos cónicos (Riaz, 2004).



Figura. 17. Extrusor de doble tornillo sin elementos cónicos (Riaz, 2004).

## **2.9.- Condiciones de proceso**

De acuerdo a las propiedades de extrusión de los ingredientes y las interacciones de los parámetros como la velocidad de tornillo, la geometría y diseño de los accesorios se puede hacer una clasificación general de los extrusores. Antes que nada se mencionan las variables más comunes que se deben tener en consideración cuando se trate de un sistema de extrusión. Son los parámetros del proceso que se modifican como resultado del cambio de una o más variables independientes. Las características del producto final son las medidas de calidad con las que debe resultar el mismo, esto ocurre debido a los cambios producidos en las variables que a continuación se mencionan.

### **2.9.1.- Variables Dependientes**

- Tiempo de residencia en el cilindro extrusor
- Textura del producto
- Nivel de expansión.

### **2.9.2.- Variables Independientes**

- Velocidad del eje del extrusor
- Agua inyectada dentro del extrusor
- Vapor inyectado dentro del extrusor
- Configuración del tornillo
- Configuración del dado
- Temperatura en el cilindro extrusor
- Humedad de la materia prima
- Presión en el cilindro extrusor
- Formulación

## **2.10.- Clasificación de los extrusores**

Las diferencias entre los equipos de extrusión dependerán mucho de las aplicaciones a las cuales se quiera someter a las características y calidad de los productos, por estas razones es importante también identificar el extrusor físicamente, como se observa en la Figura 18.




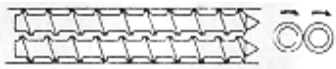
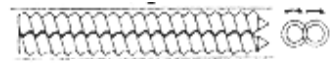

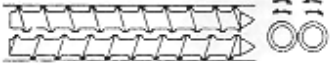

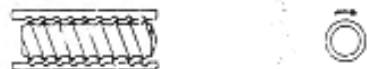
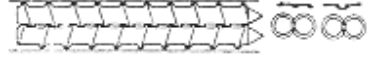


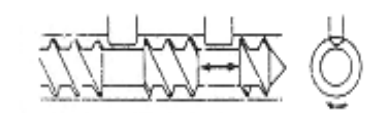
Tornillo simple	Tornillo doble	Tornillo doble (Intermezclado)
 <p>Con grado de inclinación disminuyendo.</p>	 <p>Co-rotación</p>	 <p>Co-rotación autolimpiable</p>
 <p>Diámetro del corazón en aumento</p>	 <p>Contra-rotación</p>	 <p>Autolimpiable en partes</p>
 <p>Barril enroscado</p>		 <p>Contra-rotación cilíndrico</p>
 <p>Barril cónico</p>		 <p>Contra-rotación cónico</p>
 <p>Alternando tornillos tipo pasador.</p>		

Figura. 18. Configuraciones de los tornillos para extrusión (Callejo, 2002).

### **2.10.1.- De acuerdo a la temperatura**

- Extrusores en caliente

En estos extrusores el alimento se calienta por contacto con las paredes del cilindro y/o por contacto con el tornillo calentado internamente con vapor (en algunos casos el tornillo se calienta eléctricamente por inducción), el calor también se genera por la fricción del tornillo y los relieves internos del cilindro (Tunghai, 2000).

Las fuerzas de compresión se dan como sigue:

- Aumentando el diámetro del tornillo y disminuyendo su paso de rosca
- Utilizando un cilindro tronco-cónico y un tornillo de paso de rosca homogéneo o progresivamente decreciente
- Obstruyendo las alas del tornillo.

El dado del extrusor proporciona una contrapresión adicional. Para productos expandidos se emplean presiones elevadas y dados de orificio pequeño, para productos densos se ocupan presiones bajas y dados de orificio grandes.

- Extrusores en frío

El alimento se extrude en tiras sin cocción, esto con el objeto de que la materia prima esté sometida a la mínima fricción posible, por lo tanto los tornillos poseen unas alas muy profundas y ruedan a poca velocidad en un tubo de superficie interna lisa (Tunghai, 2000).

### **2.10.2.- De acuerdo a la generación de calor**

- Extrusores adiabáticos (autógenos): Desarrollan todo el calor por fricción y operan a niveles bajos de humedad (8 -14%) (Sharma, 2003).
- Extrusores isotérmicos: Operan a la temperatura del producto constante en todas partes de la longitud total del cilindro y se utilizan principalmente para el moldeado (Sharma, 2003).
- Extrusores politrópicos: Alternativamente añaden o eliminan calor a medida que se requiere para el proceso (Sharma, 2003).

### 2.10.3.- De acuerdo al contenido de humedad

Según las características de humedad de las materias primas se tienen efectos tanto en el equipo de operación durante la extrusión y en el producto final (Riaz, 2004).

- Humedad baja  $\leq 20\%$ : Toda la energía proviene de la disipación de la energía mecánica consumida.
- Humedad intermedia  $20\% < \text{humedad} < 28\%$ : La mitad de la energía proviene de la disipación de la energía mecánica y la otra mitad de la inyección de vapor.
- Humedad alta  $\geq 28\%$ : La mayoría de la energía proviene de la inyección de vapor, con una pequeña porción proveniente de la conversión de energía mecánica a calor.
- Extrusores Secos: Este tipo de extrusores no requiere de una fuente externa de calor o de vapor. Toda la cocción se consigue mediante fricción sacando provecho de la humedad inherente y/o aceite para el suministro de la lubricación. El extrusor seco puede procesar materiales que contienen de 8-22% de humedad sin la necesidad de secado del extrudido.

La posibilidad de tratar térmicamente el producto durante el proceso, pudiéndose elegir entre un tratamiento corto a altas temperaturas o largo a temperaturas bajas. Esto proporciona lo siguiente:

- Posibilidad de inflar o gasificar el producto gracias a una rápida evolución del vapor de agua en el punto de extrusión del producto, trabajando a temperaturas por encima de  $100^{\circ}\text{C}$
- Posibilidad de una rápida deshidratación.
- Control microbiológico efectivo en producto final y destrucción enzimática.
- Posibilidad de producir fibras y una gran cantidad de formas y tamaños de pasta, para conseguir texturas de proteínas.

#### 2.10.4.- Extrusores de tornillo único

Los extrusores de tornillo único constan de una sección para transformar las partículas en una masa homogénea, una sección de amasado para comprimir, mezclar y desgarrar el alimento plastificado, ver Figura 19. El transporte de la materia prima depende del grado de fricción con la superficie del cilindro, así la energía que recibe la materia prima a tratar proviene, en gran parte, de este rozamiento. El reflujo está causado por una presión creciente que esta tras el dado y por el movimiento de la materia prima entre el tornillo y el cilindro. Este escape puede disminuirse utilizando un cilindro con relieves internos (Sharma, 2003). En algunos casos puede calentarse el exterior del cilindro por medio de una segunda camisa de vapor, si el caso es que el producto tenga un alto coeficiente de fricción, se hace necesario refrigerar el cilindro.

En los extrusores de tornillo único, tiene importancia el desgaste interno del cilindro y el tornillo, sobre todo en la zona cercana a la salida del producto, por ser éste la que soporta el máximo esfuerzo (Sharma, 2003). Se debe tener muy en cuenta el tipo de materia prima que entra al extrusor, como por ejemplo la humedad, granulometría, homogeneidad, contenido de grasa, alto contenido en azúcares. Sin embargo, el bajo costo de los extrusores de tornillo único, hace que el empleo de estas máquinas esté muy extendido en la industria alimentaria.

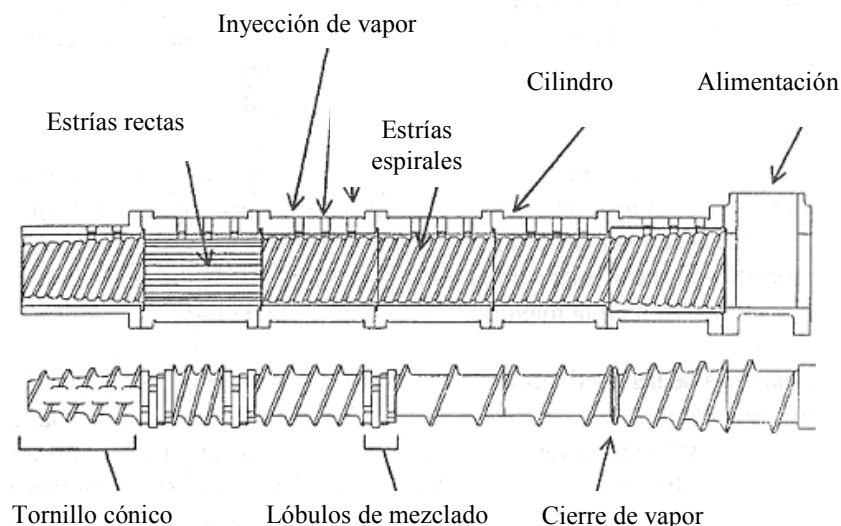


Figura. 19. Vista transversal de un sistema de extrusión de tornillo único (Sharma, 2003).

#### 2.10.4.1.- Amplitud de cizallamiento

Los extrusores de esfuerzos cortantes bajos, se refieren a extrusores de moldeo, se utilizan para dar densidad al material que generalmente tiene una humedad alta. Por otro lado los extrusores de esfuerzos cortantes medios proporcionan productos con niveles de humedad bajos y entradas de energía mecánica altos, en esta clasificación entra la obtención de proteína vegetal texturizada, puesto que se esta hablando de extrusores de tornillo único existen mas restricciones para procesar la materia prima, como se mencionará mas adelante, así que este sistema no es muy empleado en la producción de proteína vegetal texturizada (Riaz, 2004).

Los extrusores de esfuerzo cortante alto se emplean en la elaboración de productos altamente expandidos, sus velocidades y entradas de energía mecánica son muy altas mientras que su humedad y densidad son bajas, esto se puede ver ejemplificado en la Tabla 5

Tabla. 5. Clasificación de extrusores de tornillo único según cizallamiento (Riaz, 2004).

	<i>Cizallamiento</i>	<i>Cizallamiento</i>	<i>Cizallamiento</i>
	<i>bajo</i>	<i>medio</i>	<i>alto</i>
Humedad del producto (%)	25-75	15-30	5-8
Densidad del producto (g/L)	320-800	160-510	32-200
Temperatura máxima del cilindro (°C)	20-65	55-145	110-180
Presión máxima del cilindro (Kg/cm <sup>2</sup> )(KPa)	6-63	21-42	42-84
h profundidad del canal	3-5.3	5.0-8.5	8.0-18.0
Velocidad del tornillo (rpm)	< 100	> 100	> 100
<b>Ejemplos</b>	Productos de pasta, aperitivos de tercera generación, productos cárnicos, gomas.	Soya texturizada, panificables, alimentos expandidos para animales, alimentos semi húmedos,	Aperitivos, cereales para desayuno, almidones finos de ebullición.

#### **2.10.4.2.- Propulsión del Extrusor**

El propulsor del extrusor consiste en un motor eléctrico, un sistema de reducción de velocidad, un sistema de transmisión de par de torsión, y un mecanismo de soporte de cojinetes. La reducción de velocidad y la transmisión del par de torsión se logra tanto a través de la utilización de cintas en forma de “V”, éstas tienen las ventajas de ser menos caras en la instalación inicial del equipo, existe una protección para una sobrecarga del par de torsión (Guy, 2002).

Algunos sistemas de extrusión de alta velocidad tienen el motor principal de propulsión acoplado con el eje del extrusor con algún tipo de dispositivo de limitación del par de torsión para proteger el extrusor frente a altas cargas. Los sistemas de cojinetes en la mayoría de los ejes de extrusores de tornillo único son relativamente simples.

#### **2.10.4.3.- Diseño del tornillo y cilindro para extrusores de tornillo único**

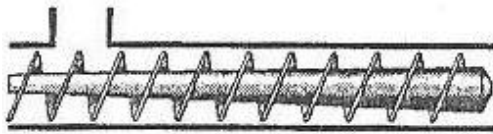
Estos equipos transportan el material desde la entrada al dado mediante el deslizamiento sobre la superficie del tornillo. En el extrusor de cocción se puede producir una resistencia insuficiente para prevenir que el extrudido se deslice en la pared del cilindro, para evitar este fenómeno, el calibre interior del cabezal del extrusor debe estar estriado longitudinalmente o helicoidalmente. Las estrías helicoidales están configuradas para propulsar el extrudido hacia el dado, y de este modo, también actúan como una ampliación de la hélice del tornillo (Riaz, 2004).

La hélice del tornillo puede ser de grado de inclinación y profundidad constante desde la entrada hasta la descarga. Tanto el grado de inclinación del tornillo como la profundidad de la rosca normalmente disminuyen desde la entrada a la descarga, ver Figura 21. Esto se da en un esfuerzo para conseguir el llenado completo del cilindro a la densidad del extrudido variando el movimiento desde la tolva hasta el dado.

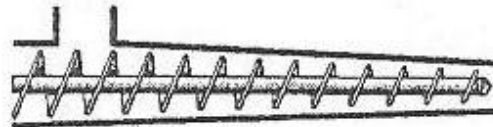
A medida que el extrudido funde y fluye a la vez durante los procesos de cocción y mezclado dentro del cilindro, su densidad aumenta justo en el interior del dado, por lo tanto, es necesario reducir el volumen del desplazamiento del cilindro para conseguir un flujo continuo (Sanchez, 2003).

También se debe cambiar el ángulo de la rosca del tornillo relativo al eje central del tornillo. En la zona de alimentación e inmediatamente después de la tolva de entrada, la rosca del tornillo debe estar aproximadamente en un ángulo recto relativo al eje central del tornillo. Esto promueve el transporte del material de densidad relativamente baja.

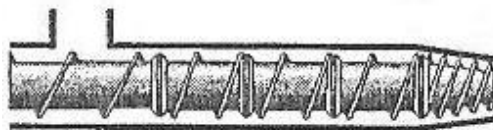
A medida que la densidad del extrudido aumenta, el ángulo de la rosca del tornillo, se aplana para aumentar el mezclado y la eficiencia del transporte (ver Figura 20).



Grado de inclinación constante, aumentando el diámetro del corazón.



Grado de inclinación constante, diámetro del corazón constante, diámetro decreciente.



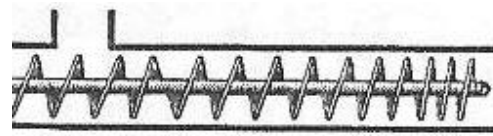
Grado de inclinación variable, profundidad constante, diámetro del corazón en aumento del número de roscas, cierres de cizalla, diámetro decreciente



Grado de inclinación constante, diámetro del corazón constante.



Grado de inclinación constante, diámetro del corazón constante, con cierres de interrupción.



Grado de inclinación disminuyendo, corazón constante.

Figura. 20. Configuraciones comunes de tornillos para extrusores de tornillo único (Fellows, 1994).

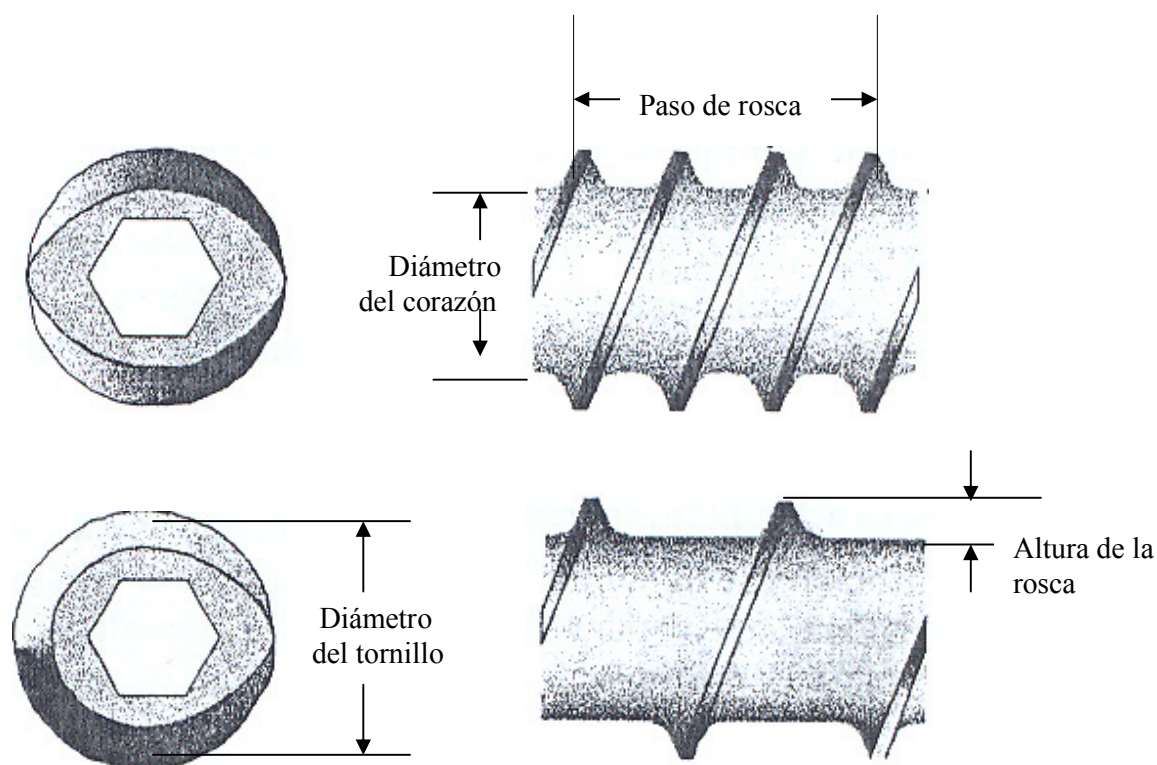


Figura. 21. Diseño y terminología para los tornillos de los extrusores (Riaz, 2004).

### 2.10.5.- Extrusores de tornillo doble

El hecho de que los tornillos estén engranados y el interior del cilindro sea perfectamente lisa hace que se logre un efecto de bomba positiva, con las siguientes ventajas (Sánchez, 2003) & (Riaz, 2004).

- Su producción es independiente del flujo de alimentación y puede ajustarse por desplazamiento positivo de los tornillos. Al contrario de lo que ocurre en los extrusores de tornillo único, en donde la materia prima debe ocupar todo el cilindro por completo.
- Se puede manejar productos aceitosos, pegajosos, con alto contenido de humedad y con alto contenido de azúcares.
- Existe mínimo rozamiento entre el producto, los tornillos y el cilindro, así se disminuye el desgaste.
- La sección de descarga, que es corta, hace que se cree la presión suficiente para lograr la extrusión, por lo que en éstos extrusores la zona sometida a mayor desgaste es menor.



Los tornillos ruedan en el interior de un cilindro de sección en forma de ocho. El movimiento de rotación impulsa al material a través del extrusor y el ataque de los tornillos entre sí mejora el mezclado y evita la rotación del alimento en el cilindro, existe una mayor área superficial y también hay mayor mecanismo de propulsión del producto hacia delante en un extrusor de doble tornillo que en un extrusor de tornillo único, por esta razón los extrusores de tornillo doble son los mas empleados en la producción de proteína vegetal texturizada, debido a que las características de la materia prima no son tan estrictas y se permiten rangos de granulometría mas grandes, además de que también se tiene el efecto que dentro del extrusor se aumenta y prolongan los sabores en la pasta antes de ser impulsados por el dado (Guy, 2002).

#### **2.10.5.1.- Tipos de extrusores de tornillo doble**

- Extrusores de doble tornillo en contra-rotación

Estos equipos no se utilizan en gran extensión en la industria de los alimentos aunque son excelentes transportadores. Son buenos en el procesado de materiales no tan viscosos que requieren velocidades bajas y grandes tiempos de residencia; (gomas, jaleas, entre otros) (Callejo, 2002).

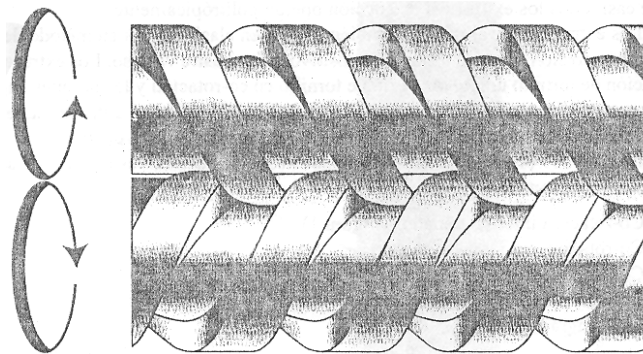


Figura. 22. Tornillos Inter-engranados en contra-rotación (Fellows, 1994).

- Extrusores de doble tornillo en co-rotación

Se utilizan más en la industria alimentaria y de aperitivos. Proporcionan altos grados de transmisión de calor pero no un medio de transporte forzado. Estos equipos ofrecen eficiencia de bombeo, buen control sobre la distribución de tiempos de residencia, mecanismo de auto limpieza y uniformidad de procesado (Callejo, 2002).

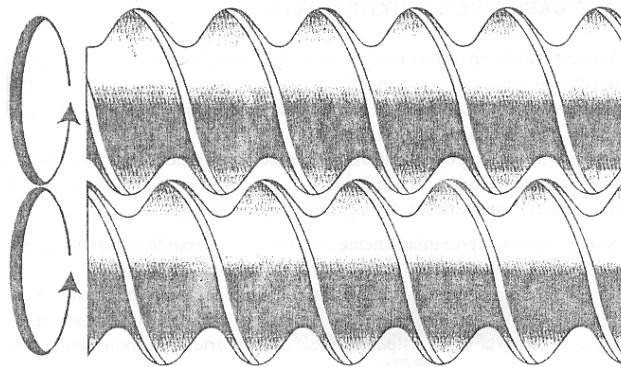


Figura. 23. Tornillos Inter-engranados en co-rotación (Fellows, 1994).

- Tornillo inter-engranado

La rosca de un tornillo engarza o penetra en los canales del otro tornillo, se da bombeo positivo, mezclado eficiente y auto limpieza.

- Tornillo no inter-engranado

Los tornillos no se engarzan uno con otro, se permite que un tornillo gire sin que interfiera con el otro; estos extrusores dependen de la fricción y funcionan igual que los extrusores de tornillo único, con mayor capacidad.

Los extrusores de doble tornillo se pueden subdividir en cinco tipos:

1. No Inter-engranado, co-rotación
2. No Inter-engranado, contra-rotación
3. Inter-engranado, co-rotación
4. Inter-engranado, contra-rotación
5. Inter-engranado cónico

### 2.10.5.2.- Diseño de la propulsión del doble tornillo

Los elementos segmentados del tornillo también proporcionan un medio por el que el perfil de cocción del cilindro del extrusor se puede cambiar para encontrar modificaciones de las materias primas o las especificaciones del producto final.

Para los extrusores de doble tornillo, el ensamble del cojinete es más complicado, y se necesitan más componentes tales como engranajes de propulsión y de distribución del par de torsión (Riaz, 2004) & (Callejo, 2002).

La potencia se puede dar al eje del extrusor o la caja de cambio tanto con un tren de engranes como con cintas en “V”, como se puede observar en la Figura 25. Ambos métodos de transferencia de potencia proporcionan la adecuada reducción de velocidad del motor a la velocidad de giro requerida para los tornillos del extrusor. Las cintas en “V” están autoprotectidas, que se deslizan si llegan a estar sobrecargadas (Riaz, 2004).

El bastidor del engranaje, el motor de propulsión y el cilindro del extrusor deben estar todos en un armazón de resistencia adecuada para soportar las cargas externas aplicadas sobre él como se ve en las Figuras 24 y 25. Esto es importante para una adecuada alineación de las secciones del tornillo dentro del cilindro del extrusor.

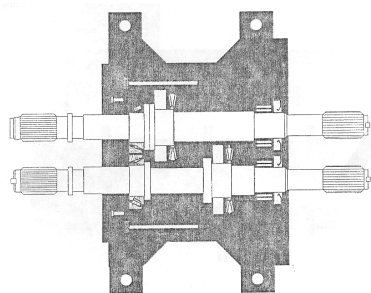


Figura.24. Propulsión para tornillo doble en un extrusor (Riaz, 2004).

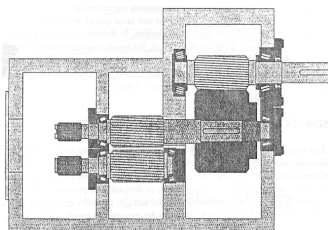


Figura. 25. Caja de cambio y propulsión para tornillo doble (Riaz, 2004).

### **2.11.- Criterios de selección del tipo de extrusor**

La elección del extrusor conlleva no solo la identificación del mejor equipo, sino también la elección del mejor sistema de extrusión para el proceso que se proyecta.

Una de las primeras decisiones a tomar es el uso de un extrusor de tornillo único ó de doble tornillo; ya que los primeros son más simples y baratos que su homólogo de doble tornillo. La primera limitación que se presenta es que la materia prima que lo alimente debe tener características específicas, como un contenido de humedad no excesivo, característica que sí se permite en extrusores de tornillo doble (Reverter, 2006).

La selección depende de varios factores:

- Propiedades físicas y sensoriales del producto final.
- Ingredientes de la fórmula (%en grasa, %de humedad, %sólidos, granulometría, entre otros)
- Tipo de producto a extrudir, grado alimenticio (para consumo animal o humano)
- Forma general, si es exótica o detallada.
- Velocidad de producción
- Fuente de energía
- Densidad global del producto final
- Si el producto se va a colorear o no
- Cambio rápido de los dados para obtener diferentes formas
- Temperaturas de amasado
- Eliminación de dispersiones de calor hacia el ambiente.
- Consistencia en la relación de la fórmula
- Velocidad de rotación del o los tornillos
- Presión.
- Diseño del contenedor para el extrusor (Tolva)

Existen dos criterios principales que deben ser tomados en cuenta para los análisis de valor y depreciación al seleccionar un equipo (Sánchez, 2003).

1. El costo del equipo amortizado a 10 años es típicamente una pequeña fracción del costo final del producto. Dicho costo es normalmente menos del 5% del costo total sobre kilogramo por unidad de producto.
2. Incrementar la eficiencia de producción a través del aumento de la velocidad de las líneas de proceso y reducción de los tiempos de parada permite disminuir el costo de producción.

Los procesadores deben trabajar con los proveedores para determinar las capacidades y limitaciones de los equipos especificados, como se explica a continuación.

- Extrusor y diseño de tornillo.

Todos los componentes deben ser diseñados para las condiciones de proceso más exigentes. Para contemplar un futuro crecimiento, los motores deben ser especificados con una potencia ligeramente mayor a la adecuada. Así mismo, el diseñador del tornillo debe tener información completa sobre los materiales a procesar, así como de las condiciones de proceso. Asegurarse de entregar información detallada sobre los tipos y dosis de aditivos que se utiliza. El diseño del tornillo sólo será eficiente con base en la información suministrada al proveedor. Tener en cuenta que un tornillo con el diseño inadecuado puede afectar las tasas de producción, la calidad del producto final y la cantidad de productos aceptados por kilogramo de material usado. De la misma forma, como la tasa de producción baja, el costo de mano de obra por kilogramo procesado aumenta (Sánchez, 2003).

- Dado.

Evaluar todas las opciones disponibles en el mercado para determinar cuál es la mejor solución para su aplicación. Todos los materiales que van a ser procesados así como los flujos y velocidades de producción esperados. En el caso del dado, así como del tornillo y del cilindro, tener en cuenta la corrosión con el fin de hacer una selección correcta de los materiales de construcción.

- Equipo opcional.

Considerar la utilización de equipos adicionales que aumenten el desempeño de la línea. Los mezcladores gravimétricos, mencionados anteriormente, pueden reducir el consumo de aditivos de alto costo. Además, pueden facilitar la utilización de altas cantidades de material reprocesado y de material fuera de especificación. También pueden mejorar el desempeño del tornillo con un amplio rango de materiales y pueden extender la vida útil de la caja de engranajes al reducir la presión de descarga del extrusor.

La elección de la configuración adecuada del extrusor es crítica para el éxito de la producción. Todos estos factores se deberán considerar cuando se decide que tipo de extrusor satisface las necesidades de producción.

### 3.- EFECTO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LOS COMPONENTES NUTRITIVOS

Durante el proceso de extrusión la mezcla a medida que se somete a las condiciones de alta temperatura y presión, así como al cizallamiento, cambia a un estado visco-elástico (Fluido no-Newtoniano). Los tratamientos tienen por objetivo mejorar la digestibilidad y la disponibilidad de los diferentes constituyentes, y adicionalmente inactivar o destruir eventuales factores antinutricionales (tripsina de la soya, glicoalcaloides de patata, aflatoxina en cacahuete, inhibidores de proteasas en legumbres).

#### 3.1.- Materias primas en extrusión

Las materias primas empleadas en extrusión van a formar una mezcla compleja que van a influir en el producto final. En la Figura 26 se muestran los tipos de materiales que se emplean para realizar mezclas en extrusión.

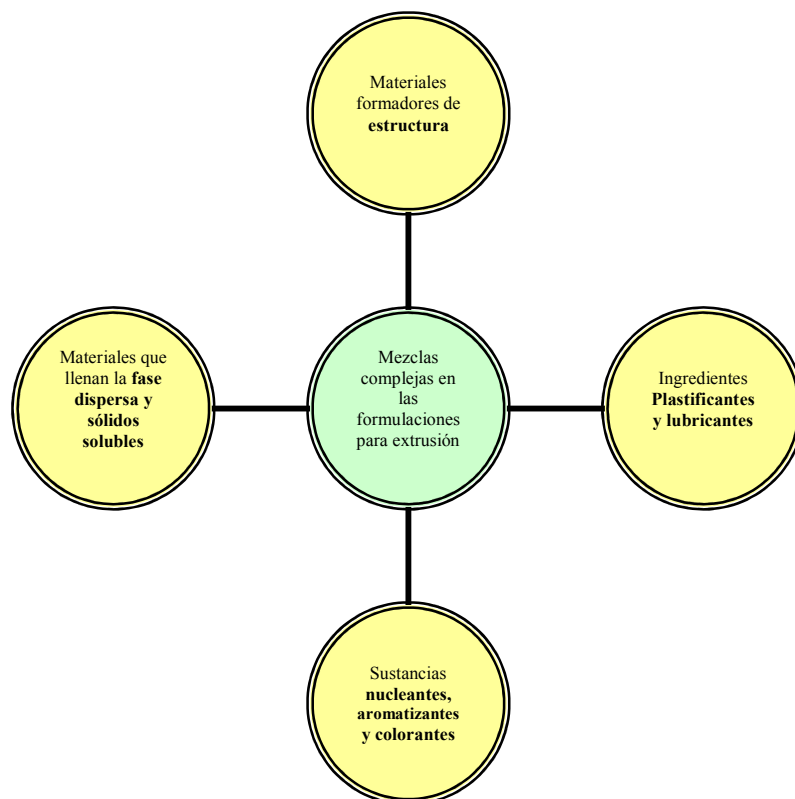


Figura. 26. Materias primas para extrusión (Capilla, 2006).

### **3.1.1.- Materiales formadores de estructura**

La estructura de un producto extrudido se crea mediante la formación de un fluido derretido a partir de biopolímeros y soplando burbujas de vapor de agua en el fluido para formar una espuma, el fluido funde los biopolímeros desde las paredes de la célula y les permite expandirse hasta que estallen. Después de la expansión, la caída rápida de la temperatura causada por la evaporación y el aumento de la viscosidad debido a la pérdida de humedad, vuelve rígida la estructura celular. El rápido aumento de la viscosidad va seguido de la formación de un estado vítreo de los biopolímeros.

Los polímeros formadores de estructura pueden tener una masa molecular mínima suficiente para dar la adecuada viscosidad al fluido para evitar o controlar el encogimiento del extrudido después que ha alcanzado su expansión máxima y ha roto la célula de gas. Si el extrudido es demasiado viscoso en este punto habrá un encogimiento rápido y una pérdida de la expansión aparente en el extrudido (Soya texturizada, 2007).

La viscosidad de las maltodextrinas es demasiado baja en los niveles de humedad utilizados en cualquier extrusión para inducir la ruptura o estabilizar las paredes de la célula frente a los efectos de retraimiento elástico. Sus extrudidos colapsarán después de la expansión debido a la presión interna baja en las burbujas no rotas; por tanto no están clasificados como materiales formadores de estructura (Badui, 1993).

Las proteínas a altas concentraciones se pueden utilizar para formar estructuras en los productos extrudidos. Se agregan y forman complejos de alta viscosidad, que sirven para formar películas rudimentarias y retienen parte del vapor de agua en expansión. Su viscosidad en el enfriamiento es suficiente para evitar el encogimiento y permite que se forme una estructura alveolar. En la Tabla 6 y 7 se muestran diferentes productos a base de proteína y almidón así como sus aplicaciones.



Tabla. 6. Productos a base de proteína (Pané, 2003).

<b>Grupo de producto</b>	<b>Tipo de producto</b>	<b>Fuente de proteína</b>
Humano	Hamburguesa	Soya/gluten de trigo
	Comidas deshidratadas	Soya/gluten de trigo
	Fideos	Soya
Alimento para animales domésticos	Trozos enlatados	Soya, gluten de trigo, haba
	Masticables secos	Soya, gluten de trigo

Tabla. 7. Productos a base de almidón (Pané, 2003).

<b>Clase</b>	<b>Tipo de producto</b>	<b>Fuentes de almidón</b>
Cereales para desayuno	Copos de maíz	Maíz
	Copos multigrados	Trigo, maíz, arroz, avena
	Copos de fibra alta	Maíz, trigo, arroz
	Arroz crujiente	Arroz
	Avena hinchada	Avena
Aperitivos	Barritas de papa	Papa, maíz
	Aros de papa	Papa
	Granos hinchados o rizados	Maíz
	Inflados	Trigo, papa, maíz
	Productos intermedios	Maíz, trigo, papa, arroz
	Maíz frito	Maíz
Alimento para animales de compañía	Formas secas para perros y gatos	Trigo, maíz, arroz
	Bocados húmedos	Trigo
	Deleites secos	Trigo, maíz
Piensos para peces	Flotantes y hundidos	Trigo

### **3.1.2.- Materiales que llenan la fase dispersa**

Las fases dispersas se sitúan dentro de la estructura continua del almidón, estas se formarán mediante cualquier proteína presente y mediante materiales fibrosos tales como celulosa o salvado. Estos polímeros formarán fases separadas dentro de la fase continua de almidón, su tamaño y forma en un determinado producto dependerá de su tamaño original de partícula y su resistencia a la cizalla durante su proceso.

Los materiales fibrosos encontrados en una formulación de cocción por extrusión deberían incluir materiales comprendidos por hemicelulosa, celulosa y derivados de lignina provenientes de cascarillas y salvado de granos y semillas. Estos materiales tienden a permanecer firmes y estables durante el proceso y no son reducidos en su tamaño durante la extrusión (González, 2006). La presencia de los materiales de la fase dispersa afecta la naturaleza del proceso en dos formas:

1. La presencia física en las paredes de la célula reducirá el potencial para la expansión de la película de almidón mediante la desestabilización de las paredes de la célula cuando sus estructuras penetran las paredes de la película.
2. La presencia de relleno disperso asociado al retraimiento elástico o al efecto de inflamiento del fluido a medida que abandona la salida por el dado.

### **Proteínas**

- Proteínas solubles en agua (albúminas de huevo y suero), se desnaturalizan mediante el calor y coagulan dentro de la masa blanda hidratada, se maceran en piezas muy pequeñas, en el intervalo de 1 – 2  $\mu\text{m}$  mediante el cizallamiento (Fennema, 1993).
- Proteínas globulares de semillas oleaginosas, se encuentran como partículas relativamente grandes, éstas se hidratan y forman masas visco elásticas mediante la aglomeración con agua.
- Proteínas de cereales, (prolamida y glutenina), forman pastas visco elásticas que se maceran en partículas pequeñas '20  $\mu\text{m}$  de dimensión máxima (Fennema, 1993).

## **Almidones**

- Almidones de amilomaíz, tienen una estructura mas fuerte, unida, funden y a menudo a una temperatura mucho mas alta que los almidones normales. Si se añaden a sistemas de bajo cizallamiento o a extrusiones gelatinizadas de almidón pueden permanecer intactos como material de la fase dispersa.

### **3.1.3.- Sólidos solubles**

Algunos materiales de masa molecular baja, como azúcares o sales, se pueden añadir a una formulación para conseguir propiedades aromatizantes o humectantes.

Se disolverán en agua libre de la masa durante la etapa inicial de mezclado; su efecto en el proceso de extrusión dependerá de su concentración y su interacción química con los polímeros de almidón y proteína (Horts, 2001).

### **3.1.4.- Sustancias nucleantes**

El carbonato cálcico en polvo y el talco (silicato de magnesio), son sustancias que aumentan la nucleación<sup>7</sup> de la burbuja en el fluido derretido caliente en el extrusor.

La adición de este tipo de materiales es que permanecen insolubles en la masa y proporcionan superficies para reducir la energía requerida para la formación de burbujas individuales (Horts, 2001).

### **3.1.5.- Sustancias aromatizantes**

Los compuestos aromatizantes se pueden añadir dentro del extrusor o en operaciones posteriores; o añadir precursores de la formación de aroma en las reacciones térmicas dentro del extrusor.

### **3.1.6.- Sustancias colorantes**

Se pueden incluir colores estables al calor o precursores de formación de color mediante reacciones térmicas.

---

<sup>7</sup> NUCLEACIÓN: Es el comienzo de un cambio de estado en una región pequeña pero estable. El cambio de estado puede ser la formación de gas o cristal a partir de un líquido.

### **3.1.7.- Ingredientes que actúan como plastificantes y lubricantes**

El agua es el componente que hidrata y solvata<sup>8</sup> el almidón y los polímeros de proteína a un nivel >10% el extrudido cambia de un estado vítreo a un fluido elástico viscoso (Igoe, 1998).

En masas de humedad baja utilizadas para la cocción por extrusión, las interacciones físicas iniciales en la formulación causan la disipación de energía friccional y mecánica.

La adición de ingredientes tales como agua sirve para reducir las interacciones por plastificación de las formas secas de polímeros, transformándolos desde sólidos a fluidos plásticos. La adición de cantidades crecientes de agua reduce la disipación de energía mecánica y reduce la entrada de calor a medida que se aumenta el nivel de humedad.

Los niveles de cizalla aplicados se pueden reducir mediante la presencia de aceites y grasas, estos materiales sirven para lubricar tanto las partículas en interacción en la masa como las partículas que están friccionando frente a las superficies del metal de los tornillos y el cilindro.

En materias primas con bajo contenido en aceites y grasas, los polímeros están sujetos a un alto efecto de calentamiento por fricción, degradándose en gomas pardas adhesivas.

Los aceites y grasa actúan como lubricantes entre la materia particulada y los tornillos del extrusor. A niveles de aceite >2% los gránulos de almidón se pueden fundir durante el proceso de extrusión pero sin dispersarse (Kill & Turnball, 2004). Esto tiene efectos sobre:

- Palatabilidad del producto.
- Estructura celular.
- Textura superficial del producto, lo que se busca en proteína vegetal texturizada

---

<sup>8</sup> SOLVATACIÓN: Es el proceso de interacción entre las moléculas de un solvente y las de un soluto formando agregados.

### 3.2.- Extrusión y cambios fisicoquímicos en los nutrientes

La temperatura se va incrementando por la transformación de la energía mecánica en calor en el mismo extrusor, y por la configuración del mismo que asegura las condiciones de fricción y cizallamiento adecuado. El agua es sometida a temperaturas muy superiores a las de su evaporación, pero permanece en estado líquido porque se encuentra sometida a elevadas presiones, en el momento en que el producto sale por el dado, el agua que está íntimamente mezclada con el producto, sufre un brusco cambio de presión y se evapora instantáneamente.

Las cadenas proteicas así como las de almidón son modificadas, aumentando la superficie con lo que el producto se hace más digerible, ver Tabla 8.

Tabla. 8. Cambios generales en la extrusión (Kill & Turnbull, 2004).

Cambios químicos	Cambios fisicoquímicos
División	Enlace de moléculas mas pequeñas
Recombinación de fragmentos	Pérdida de la estructura natural
Degradación térmica	

La composición de los alimentos se altera mediante las perdidas físicas incluyendo la pérdida de aceite, la vaporización de agua y componentes volátiles en el dado. Puesto que la mayoría de las reacciones químicas tienen lugar en la porción del cilindro justo antes del dado, los compuestos lábiles (sabores y vitaminas) se pueden inyectar en este punto para minimizar la exposición al calor y cizallamiento.

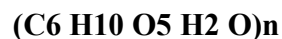
### 3.2.1.- Almidón

El almidón es un hidrato de carbono que se encuentra principalmente en los cereales, tubérculos y otras semillas (ver Figura 27). Al igual que la celulosa, es un polímero de glucosa, con la diferencia de que en el almidón las moléculas de glucosa están ligadas por un enlace  $\alpha$  1- 4 en lugar del  $\beta$  1- 4 de la celulosa.



Figura. 27. Principales fuentes de almidón (Industrial de alimentos, 2007).

El almidón se encuentra en los cereales en forma de gránulos pequeños de diferentes formas: esféricos, ovalados, lentillas e irregulares. Dentro de los cereales el almidón existe en forma hidratada, polimérica y formando un entramado cristalino. Su composición química responde a una fórmula empírica:



Cuando el almidón se trata en agua caliente aparecen dos fracciones, el componente más soluble la amilasa que se disuelve y la amilopectina que permanece insoluble, ver Figura 28. En los cereales la amilasa viene a representar el 10-20% y la amilopectina el 90-80% del almidón total (Guy, 2002). La estructura del almidón es la siguiente:

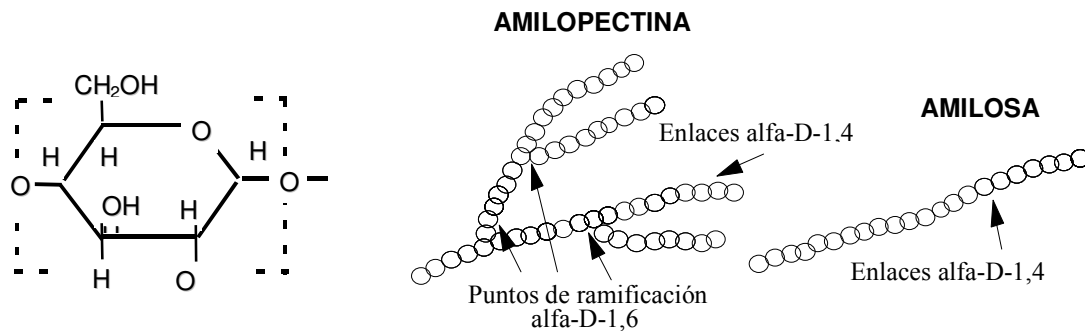


Figura. 28. Estructura química del almidón (Industrial de alimentos, 2007).

En el proceso de extrusión, el gránulo de almidón absorbe agua y en el instante de salida del dado del extrusor el agua sometida a presión pasa a vapor y el almidón sufre un proceso de alineamiento, rizado y rotura tal como se muestra en la Figura 29.

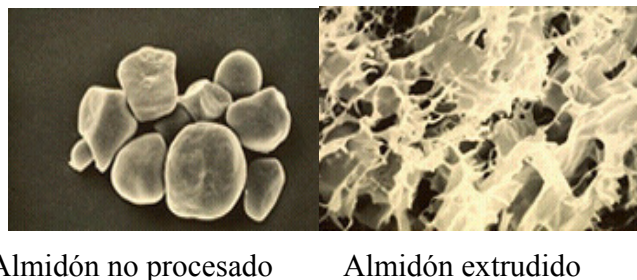


Figura. 29. Comparación de almidones dentro de un extrusor (Soya texturizada, 2007).

La estructura altamente ramificada de la amilopectina es propensa al cizallamiento, pero las moléculas de amilosa y amilopectina pueden disminuir en su masa molecular. Una consecuencia importante de la degradación del almidón es la de reducir la expansión.

La expansión, que usualmente se mide mediante la comparación del diámetro del extrudido con el orificio del dado, se correlaciona con la textura del producto. Los productos altamente expandidos se pueden desintegrar fácilmente debido a las paredes finas de las celdas, mientras que los productos densos a menudo son duros, esto se puede observar en la Tabla 9 donde se presentan algunos factores de estos cambios.

Teóricamente, los azúcares reductores terminales en los fragmentos de las ramas de amilopectina podrían formar enlaces anhidro con otros hidratos de carbono (Yufera, 1998)

Tabla. 9. Factores que aumentan la expansión de los materiales almidonosos (Rokey, 2005).

<b>Factores de la extrusión</b>	<b>Factores de la alimentación</b>
Temperatura del cilindro alta	Contenido de humedad alta
Configuración del tornillo	Contenido alto de amilosa
Relación longitud del troquel/diámetro	Contenido en fibra dietética, proteína, lípidos (generalmente bajo)

La digestión del almidón es ampliamente dependiente de la gelatinización completa. La temperatura de gelatinización está asociada con la ruptura de los puentes secundarios de hidrógeno que mantienen las cadenas de polímeros unidas.

Los gránulos se hinchan, debido a una adsorción<sup>9</sup> de agua por los grupos polares hidroxilo. En ese momento la viscosidad de la suspensión de almidón aumenta considerablemente, porque los gránulos hinchados se adhieren los unos a los otros.

Si se prolonga el tratamiento, puede surgir una ruptura de los gránulos, hidrólisis parcial y disolución más o menos completa de las moléculas constituyentes, lo que origina un descenso de la viscosidad. Posteriormente, al descender la temperatura, se observa la formación de un gel, es decir aumenta nuevamente la viscosidad, fenómeno al que se denomina retrogradación.

Los cambios morfológicos durante la gelatinización del almidón van a depender del origen del almidón. De igual modo su comportamiento dependerá del contenido en amilosa.

---

<sup>9</sup> ADSORCIÓN: Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material.



La fuerte unión proteína-almidón intracelular en el endospermo de los granos duros, es debido a que las proteínas cubren toda la superficie del almidón evitando que se rompan fácilmente los gránulos y el alto contenido de amilosa en algunas variedades puede dificultar la obtención de una adecuada gelatinización del almidón (Valls, 2003).

Los almidones de alto contenido en amilosa son resistentes a la cocción debido a la naturaleza cristalina de la amilosa, sólo hay hinchazón a temperatura elevada y si se mantiene moderada, no hay gran aumento de la viscosidad

Debido a su naturaleza cristalina, la amilosa sólo se hincha a temperatura elevada y siempre tiende a recristalizar favoreciéndose la retrogradación. Sin embargo, la amilopectina presenta un grado de cristalinidad muy inferior al de la amilosa y por tal no tienen tendencia a la recristalización, posee un elevado poder de retención de agua, contrariamente a la amilosa (Valls, 2003).

### 3.2.2.- Proteínas

Como se observa en la Tabla 10, durante la extrusión se presentan varios cambios en la estructura de las proteínas, la desnaturalización es indudablemente la más importante.

Tabla. 10. Cambios proteicos durante la extrusión (Valls, 2003).

<b>Cambios funcionales</b>	<b>Cambios nutritivos</b>
Solubilidad reducida en agua y Texturización	Lisina reducida Digestibilidad mejorada

La mayoría de las enzimas pierden la actividad dentro del extrusor. Durante la extrusión, los enlaces disulfuro se rompen y se pueden reformar. En este proceso la estructura cuaternaria de las proteínas se abre permitiendo una alteración en su posición (Fox, 2000).

Se producen nuevas interacciones hidrofóbicas, enlaces puente de hidrógeno y bisulfito, ver Figura 30. Parámetros como temperatura, cizallamiento, humedad y energía aportada, afectan al contenido de proteínas insolubles. Una disminución en la energía mecánica aportada aumenta la no solubilidad de las proteínas, debido a la formación de enlaces no-covalentes y disulfido. Una disminución en el contenido de humedad potencia las interacciones proteína-proteína en lugar de proteína-agua (Valls, 2003).

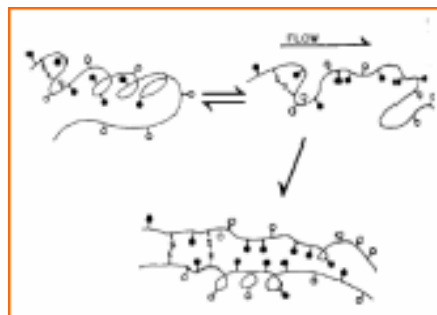


Figura. 30. Desnaturalización de proteínas (Valls, 2003).

Las proteínas de alta masa molecular se pueden disociar en subunidades más pequeñas, así las reacciones de Maillard tienen lugar durante la extrusión, particularmente a las temperaturas del cilindro más altas y a las humedades de la alimentación mas bajas, esta reacción es específicamente adversa por que en ocasiones lo que se busca es impartir color café típico de la proteína vegetal texturizada, como se observa en la Figura 31 las zonas en donde ocurre la reacción de Maillard abarca parte de la zona de alimentación hasta la zona de cocción final, sin embargo, en esta zona es donde primordialmente se da la mayoría de estos cambios químicos, debido a presencia de temperaturas altas, cizallamiento y presión, ejercidas sobre la masa viscoelástica, de igual manera los azúcares libres se pueden producir durante la extrusión para reaccionar con la lisina y otros aminoácidos con aminos terminales libres ocasionando reacciones complejas como las siguientes:

- Reacciones de transaminación
- Reacciones de oxidación
- Reacciones de  $\beta$ -eliminación
- Reacciones de empardeamiento lipídica

La solución, es trabajar bajo condiciones de temperatura y humedades bajas que a la vez sean capaces de inhibir la tripsina como parámetro de seguridad alimentaria en la soya.

Pero esto a su vez se tiene que especificar durante el proceso para no alterar al producto final en cuanto a su textura (Rokey, 2005)

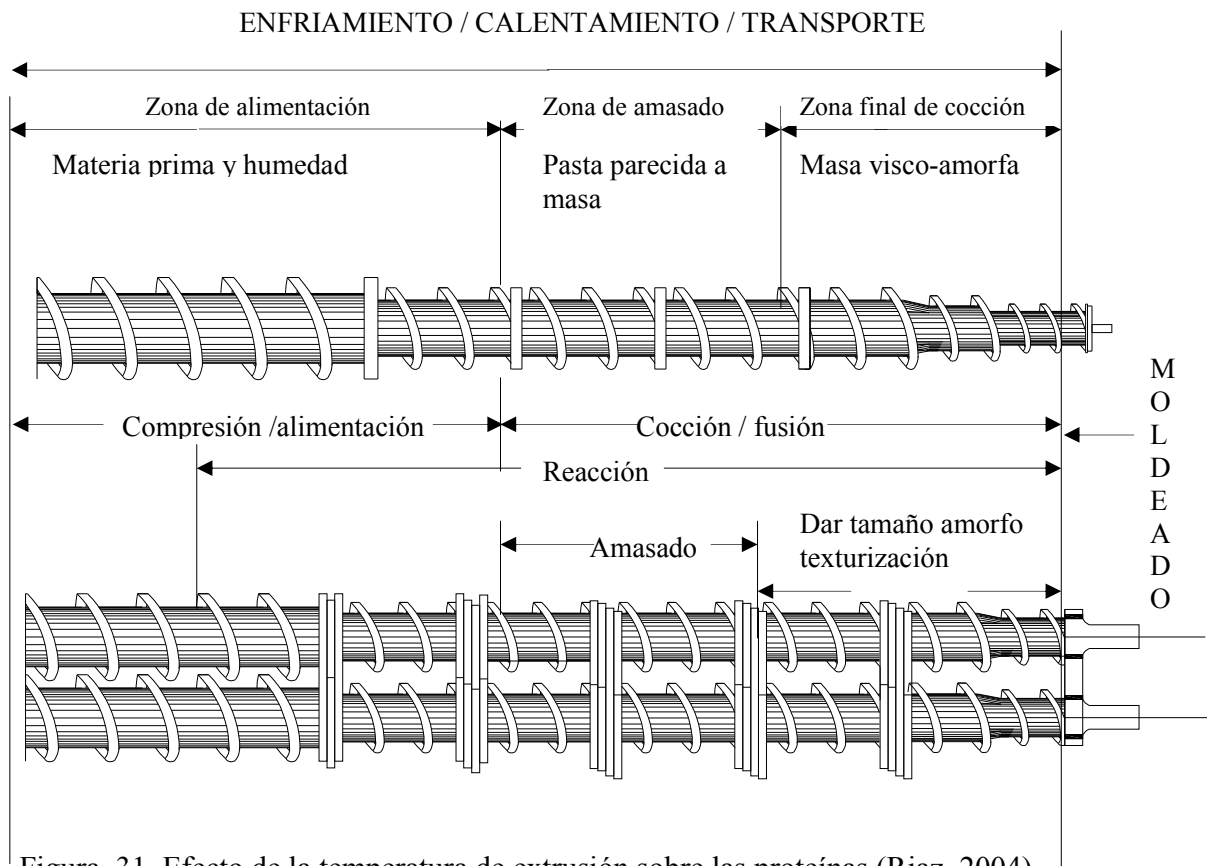


Figura. 31. Efecto de la temperatura de extrusión sobre las proteínas (Riaz, 2004).

Es conocido que la lisina es un aminoácido muy reactivo y el proceso que sea menos agresivo será el mejor desde el punto de vista nutritivo. En ausencia de cantidades importantes de almidón, la cocción por extrusión reduce la solubilidad de la proteína cuando la temperatura aumenta. En productos con elevado contenido en almidón, la proteína queda encapsulada dentro de la matriz formada por el almidón.

Sin embargo las enzimas digestivas del tracto intestinal disuelven la matriz de almidón, liberando la proteína.

De acuerdo a la Figura 32, la proteína de soya se deberá desnaturalizar dentro del extrusor a un pH de 4.0 a 4.2 que es el punto isoeléctrico<sup>10</sup> de la soya para conseguir la formación de la textura adecuada (Kearns, 2006).

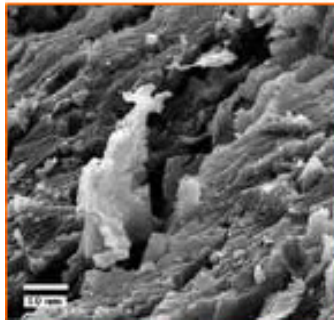


Figura. 32. Proteína degradada dentro del proceso de extrusión (Kearns, 2006).

### 3.2.3.- Lípidos

Los materiales con alto contenido en grasa generalmente no son extrudidos. Niveles de lípidos por encima de 10% deterioran el redimiendo del extrusor (Reverter, 2006).

El lípido es liberado de las células debido a la cocción y a la rotura física de las paredes de las células. Generalmente las lipasas y peroxidasas son inactivadas durante el proceso de extrusión en condiciones normales, mejorando la estabilidad posterior del producto.

En general, el contenido de lípidos del alimento parece ser mas bajo después de la extrusión, debido a que los lípidos se pueden perder en el dado como aceite libre y a la formación de complejos con amilasa o proteínas (Valls, 2003).

---

<sup>10</sup> PUNTO ISOELÉCTRICO: Es el pH al que una sustancia anfótera tiene carga neta cero. A este valor de pH la solubilidad de la sustancia es casi nula.

Los ácidos grasos libres son un problema en los alimentos debido a que son más susceptibles de oxidar que los triglicéridos, la extrusión puede prevenir la liberación de ácidos grasos libres mediante la desnaturalización de las enzimas hidrolíticas.

Los efectos del procesado de extrusión son:

- Isomerización de ácidos grasos insaturados: Efecto sobre la posición cis-trans de los dobles enlaces.
- Efecto de enranciamiento oxidativo: Generalmente el proceso por extrusión produce un descenso del valor de peróxido (altas temperaturas), aunque existen referencias que indican lo contrario al producirse una rápida descomposición de los peróxidos.
- Formación de complejos con almidón y fracción proteica: Durante el proceso por extrusión los lípidos libres forman complejos con estas moléculas, proceso afectado principalmente por el contenido en humedad y temperatura.
- Control sobre enzimas oxidativas: Puede aumentar el contenido de metales de transición que catalizan procesos oxidativos.

La oxidación lipídica puede deteriorar rápidamente las cualidades sensoriales y nutritivas de los alimentos y piensos, en la Tabla 11 se presentan algunos factores que pueden propiciar la oxidación en el producto extrudido. Por otra parte, la extrusión desnaturaliza las enzimas que pueden promover la oxidación.

Los lípidos mantenidos dentro del almidón son menos susceptibles a la oxidación, los compuestos producidos mediante las reacciones de Maillard también pueden actuar como antioxidantes.

Tabla. 11. Factores de la extrusión que afectan la oxidación lípidica (Valls, 2003).

<b>Factores que aumentan la oxidación</b>	<b>Factores que reducen la oxidación</b>
Desgaste del tornillo	Inactivación enzimática
Expansión	Formación de compuestos antioxidantes vía reacción de Maillard
Actividad de agua baja	Complejos lípido-amilosa

El desgaste del tornillo es una preocupación puesto que los metales pueden actuar como pro-oxidantes durante el almacenamiento originando la rancidez en los productos extrudidos. Una proteína vegetal texturizada con buen tratamiento térmico, se almacena hasta nueve semanas.

### **3.2.4.- Vitaminas**

Propiedades generales de las vitaminas:

- Son compuestos orgánicos, de estructura química variada, relativamente simple.
- Se encuentran en los alimentos naturales en concentraciones muy pequeñas.
- Son esenciales para mantener la salud y el crecimiento normal.
- No pueden ser sintetizados por el organismo, razón por la cual deben ser provistas por los alimentos.
- Cuando no son aportados por la dieta o no son absorbidos en el intestino, se desarrolla en el individuo una carencia que se traduce por un cuadro patológico específico.

Papel funcional de las vitaminas:

- Pese a su carácter de nutrientes naturales, las vitaminas no desempeñan funciones plásticas ni energéticas.
- Muchas de las vitaminas integran sistemas enzimáticos, actuando como coenzimas o formando parte de la molécula de coenzimas.
- Otras cumplen su papel de un modo similar al de las hormonas, por esto son participantes esenciales de numerosas vías metabólicas y procesos fisiológicos.

Minimizando la temperatura y el cizallamiento dentro del extrusor se protegen la mayoría de las vitaminas. Entre las vitaminas A y E y sus compuestos correlacionados, carotenoides y tocoferoles, respectivamente, no son estables en presencia de oxígeno y calor. El  $\beta$ -caroteno precursor de la vitamina A se añade a los alimentos como agente colorante y antioxidante. La degradación térmica es el factor principal que contribuye a las pérdidas de  $\beta$ -caroteno durante la extrusión, así como a las pérdidas de vitaminas solubles en agua como la tiamina y al ácido ascórbico (vitamina C).

Algunos factores principales que ayudan a la pérdida de vitaminas durante la extrusión son los mencionados en la Tabla 12.

Tabla. 12. Parámetros que influyen en la destrucción de vitaminas (Rosenstein, 2005).

Temperaturas altas del cilindro y de la masa
Velocidad alta del tornillo
Entrada alta de energía específica
Humedad baja de la alimentación
Diámetro pequeño del troquel
Presión alta

### 3.2.5.- Toxinas

Uno de los beneficios más importantes de la cocción por extrusión es la reducción de las toxinas naturales y los antinutrientes puesto que muchos alimentos, especialmente las oleaginosas y legumbres, tienen compuestos químicos que son venenosos o reducen la utilización de los nutrientes. Muchos alimentos, particularmente las oleaginosas y legumbres, contienen inhibidores de tripsina (IT) que interfieren con las enzimas que digieren las proteínas. El consumo a largo plazo de IT conduce a la atrofia del crecimiento y a la hipertrofia pancreática, puesto que el cuerpo responde al IT produciendo más enzimas.

Otro asunto importante de seguridad es el de los alérgenos en los alimentos. Aunque la extrusión no puede eliminar las proteínas alérgicas en los alimentos, utilizando elementos de amasado del tornillo permite la reducción de los alérgenos en soya a temperaturas relativamente bajas, esto se da por el aumento del cizallamiento.

### **3.2.6.- Sólidos solubles**

Las formas más comunes de sólidos solubles en productos extrudidos son:

- Hidratos de carbono pequeños
- NaCl (sal)

Efectos del procesado de extrusión:

A una concentración <5% (Valls, 2003).

- Se disuelven en la fase acuosa y forman un fluido plastificante más viscoso.
- Bajo efecto sobre los polímeros formadores de estructura.

La adición de azúcar:

- Aumenta el volumen y diluye el almidón en el fluido.
- Reduce la reacción mecánica a la compresión y cizallamiento.
- Disminuye la temperatura y la expansión.

### **3.2.7.- Sabores**

Muchos alimentos extrudidos son insípidos puesto que existe poco tiempo para el desarrollo del sabor, puede tener lugar la degradación térmica. Los sabores volátiles se evaporan súbitamente con el vapor de agua cuando el alimento sale del extrusor en el dado. Las temperaturas más altas del cilindro y las humedades más bajas de la alimentación favorecen la formación de compuestos de Maillard, y los compuestos químicos heterocíclicos durante el proceso se consideran importantes para el típico sabor de grano cocido. Los niveles de aplicación son distintos según el producto, generalmente la concentración de los saborizantes se encuentran entre un 0.05-0.1 % del peso total del alimento, pudiendo llegar en algunos casos al 2% (Rokey, 2005). La reacción de Maillard implica reacciones entre grupos carbonilo de azúcares reducidos y el grupo amino libre de aminoácidos. Los principales aromas volátiles producidos son compuestos heterocíclicos: Tiazoles, piroles, pirazinas y piridinas.



### **3.2.8.- Fibra dietética**

La ventaja de la fibra elevada en alimentos es debida a los beneficios de salud atribuidos a la fibra soluble. Pero no es claro si la fibra soluble creada durante la extrusión tiene los mismos efectos saludables como los materiales naturales solubles.

### **3.2.9.- Minerales**

Los alimentos con contenido más alto de fibra dietética aumentan la transferencia del metal desde los tornillos del extrusor y del cilindro hacia el propio alimento. Estos elementos químicos deben ser adicionados en la etapa final de cocimiento antes de salir del dado, esto debido a que si se adicionan previo a la extrusión, es decir en la zona de amasado, el hierro en particular forma compuestos fenólicos que son de color oscuro y dan una apariencia desagradable al producto final (Valls, 2003).

### **3.2.10.- Fotoquímicos**

Los compuestos fenólicos en granos, frutas y vegetales actúan como antioxidantes y pueden ser beneficios para la salud. Los compuestos fenólicos totales libres, sobre todo el ácido clorogénico, disminuyen de modo significativo debido a la extrusión al manejar condiciones altas de temperatura del cilindro y humedades de la alimentación.

#### 4.- TECNOLOGÍA DE LA SOYA

4.1.- Obtención de harinas y proteína de la soya. En la Figura. 33 se muestra la obtención de harinas desgrasadas, proteínas y aceite de soya.

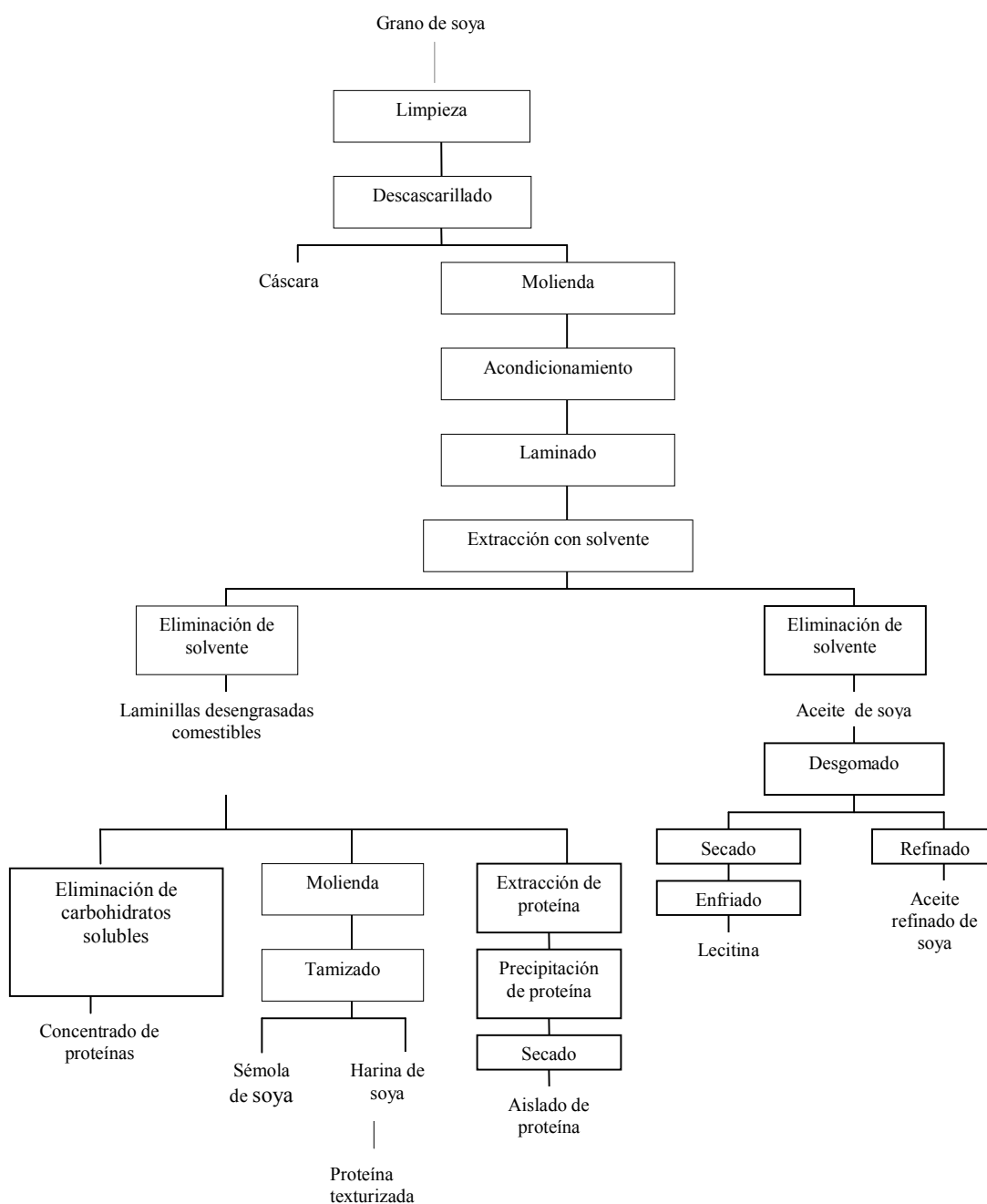


Figura. 33. Proceso de elaboración de productos a base de soya (modificado de Pané, 2003).

El proceso de elaboración de los productos de soya sin aceite es el mismo hasta la extracción por solvente, es importante hacer la aclaración que por el tema de este trabajo solo se enfocará a la elaboración de proteína vegetal texturizada y se dará una descripción breve de la obtención de aceite y harina de soya, hasta el proceso de extracción con solvente, mas adelante se explicará con amplitud el proceso de texturización de harina de soya.

- Limpieza: Puede hacerse por medio de cepillos, aire de alta velocidad, vapor de agua, atracción magnética el cual remueve las partículas de hierro, acero y otros objetos metálicos, todo esto de acuerdo con el producto y la naturaleza de la materia extraña. Específicamente la separación magnética es donde todos los sólidos pueden clasificarse en dos categorías: diamagnéticos y paramagnéticos. Los paramagnéticos pueden ser divididos fuertemente en magnéticos, débilmente magnéticos y no magnéticos. La separación magnética abarca dos consideraciones: trampas magnéticas (detectores de metales), concentración y purificación (Guy, 2002).
- Descascarillado: Consiste en la separación de un sólido de otro sólido y el desprendimiento de cáscaras y tegumentos, es efectuado por el paso de los frijoles a través de 2 ó 3 pares de rodillos en donde cada par viaja a diferentes velocidades con el fin de ejercer el rompimiento (Guy, 2002).
- Molienda: Después de un agitado violento con diferentes mallas de tamizado son separadas las semillas grandes y pequeñas, en seguida sigue la operación de rompimiento a través de rodillos, los cilindros corrugados de corte en espiral usualmente provocan de 6-10 cortes por pulgada. Los rodillos tienen de 33 a 36 centímetros de diámetro y 115.2 centímetros de largo (Riaz, 2004). El rompimiento se efectúa de 6 a 8 piezas, por último los frijoles quebrados son acondicionados a una humedad de 10-11% con una temperatura previa de 71°C y se hacen pasar a través de rodillos lisos (48-77cm de diámetro y 101-115cm de longitud) (Guy, 2002). El margen es usualmente ajustable con el fin de que las hojuelas posean un espesor uniforme que puede variar de 0.22mm a 0.36 mm ya que si éste es mayor la extracción de aceite se hace hasta 80 veces más lenta.

- Hojuelado: El objetivo del hojuelado es la ruptura de las células del frijol para provocar un aumento en la superficie de contacto con el solvente y la reducción de la distancia que por difusión el aceite y el solvente recorren durante la extracción.
- Extracción del solvente: Las hojuelas son enviadas al extractor a través de una cinta transportadora. La extracción se lleva a cabo de diversas formas, incluyendo un periodo de remojo para eliminar la mayor parte del aceite y el flujo a contra corriente de las hojuelas y el solvente.

Los tres principales usos del frijol de soya son el aceite, harinas y las proteínas, su importancia radica en el hecho de que es una semilla rica en aceite de buena calidad, que a su vez se industrializa para obtener subproductos, de igual manera benéficos para la salud y sobre todo su costo que en sí, de la semilla no es tan superior comparada con otras oleaginosas o leguminosas. A continuación se da una breve descripción de estos productos a partir de la soya.

### **Aceite**

El frijol de soya es muy rico en aceite, su rendimiento aproximado en un grano normal, es de un 20 por ciento del peso de la semilla. Si bien esta semilla es un oleaginosa de reciente explotación, que ya ocupa el segundo lugar en el conjunto de los aceites vegetales.

Las hojuelas mojadas con solvente caen en una cámara a través de la cual circulan vapores de hexano a contracorriente al flujo de las hojuelas en la etapa de desgomado, el aceite bruto obtenido pasa a la etapa de refinación e hidrogenación. A medida que el aceite cae a través del hexano supercalentado, el 99% del hexano se recupera instantáneamente (Baquero, 1988). El aceite es transportado al extremo opuesto de la unidad y cae a través de una válvula rotatoria a un transportador-mezclador donde si se desea puede agregarse agua. En este punto el aceite sale de la sección del mezclador, a través de una segunda válvula rotatoria y cae en un deodorizador, donde se extrae el aceite por medio de vapor, de esta manera se obtiene al final aceite puro de soya.

## **Harina**

Una de las explotaciones del fríjol de soya, es su industrialización en los molinos para la obtención de la harina, este producto está frecuentemente entre los líderes como la harina de maíz o fécula de papa, se utiliza para diversos procesos en la industria alimenticia.

Existen varios tipos de harina de soya como las siguientes:

- Harina de soya desgrasada: Es producida por la eliminación casi total del aceite de soya mediante el uso de hexano u otros solventes homólogos de hidrocarburos, por lo regular este tipo de harina tiene 1% de grasa (González, 2006).
- Harina de soya con bajo contenido en grasa: Se obtiene mediante la eliminación parcial del aceite o la reintegración de aceite de soya y/o lecitina a la harina desgrasada, con un rango de 5 a 6% en grasa (González, 2006).
- Harina de soya con alto contenido en grasa: Se obtiene cuando se reintegra aceite de soya y/o lecitina a la harina desgrasada, con un rango de 15% en grasa.
- Harina de soya integral: Esta harina contiene todo el aceite originalmente presente en la soya cruda, usualmente con un porcentaje de 18 a 20% en grasa (González, 2006).
- Harina de soya lecitinada: Contiene bajo o alto contenido de grasa cuando se le agrega lecitina a la harina de soya desgrasada, obteniendo hasta un rango de 15% en grasa (González, 2006).

## **Proteína**

Combinación ocurrente en forma natural de aminoácidos conteniendo los elementos químicos de carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y usualmente azufre.

- Proteína aislada de soya: Es una proteína concentrada ya sea por medios químicos o mecánicos. Eliminando carbohidratos y la materia mineral asociada con la proteína natural, conteniendo un mínimo de 90% de proteína (Kearns, 2006).
- Proteína texturizada de soya: Procesados de fuentes proteicas extrudidos, se elaboran como fibras, tiras, trozos, pizcas, gránulos, rebanadas y otras formas. Al prepararse para consumo mediante hidratación, cocimiento, ebullición, la proteína retiene su integridad estructural y su característica textura de masticación (Kearns, 2006).
- Proteína concentrada de soya: Es el producto obtenido de la semilla de soya a partir de harinas u hojuelas desgrasadas eliminando compuestos no proteicos solubles en agua y conteniendo un mínimo de 70% de proteína (Kearns, 2006).

### **4.2.- Otros productos de soya en la industria de alimentos**

#### Análogos de carne

Productos de proteína hilada fabricados para simular alimentos con tejido muscular de varias fuentes animales en apariencia, textura, sabor o comportamiento.

#### Bebidas de sabores

Estos productos son aquellos que han salido al mercado respaldados por marcas internacionales, se encuentran en una gran variedad de sabores, tamaños y presentaciones, donde su base principal es la soya.

#### Germinado

Los granos pequeños del frijol verde, seleccionando los de similar tamaño, se escogen para la germinación. Se dejan en remojo aproximadamente doce horas en agua. Un litro y medio de agua a la que se le añade una pizca de cloruro de cal para medio kilo de frijoles, se colocan a germinar en un recipiente tapado con una servilleta limpia y húmeda. Se coloca en un lugar oscuro si se desea una germinación blanca.

Se debe humedecer bien tres veces por día con agua clorada. El frijol germinará rápidamente y a los cuatro o cinco días ya tendrá los brotes para utilizar en ensaladas crudos o cocidos. Si no los utiliza inmediatamente, deberá guardarlos en el refrigerador.

#### Leche de soya

Se puede extraer este extracto acuoso de soya, partiendo del frijol seco y crudo de la harina aunque es preferible el frijol seco.

#### Manteca vegetal

Producto graso semisólido, elaborado totalmente con aceites refinados de soya.

#### Margarina

Alimento comestible graso, usado como sustituto de mantequilla y otras aplicaciones similares, conteniendo un mínimo de grasa de 80%, mezclado con alguna forma láctea y vitaminas como A y D para mejorar sus características físicas y de sabor.

#### Miso

Preparado con soya remojada, calentada al vapor, la cual se inocula con cultivos de microorganismos desarrollados en arroz o cebada, permitiéndose luego la fermentación.

#### Queso de soya

Se produce a partir de la leche de soya y se utiliza en la elaboración de ciertas comidas. La leche de soya es una elaboración acuosa del frijol, que tiene el aspecto de la leche de vaca. El queso se prepara mediante la coagulación de la leche, la que se pone a agriar previamente, luego se somete a cocción y se cuela. Puede usarse una solución de clorato de magnesio o de ácido cítrico (o el jugo de un limón por cada litro de leche de soya) que se agrega a la leche endulzada para colarlo mediante lienzo o colador. La pasta se pone en moldes que la ajusten y le den forma, y se guardan sumergidos en agua fría salada pues se descompone en contacto con el aire.

### Frijol de soya

Una de las formas de consumo para la alimentación humana es directamente el grano de calidad y envasado. El frijol de soya verde o en vaina se prepara en ensaladas. Para sacar los granos verdes de la vaina luego de arrancarlas, se sumergen cinco minutos en agua hirviendo y así se sacan los granos con facilidad. Después pueden cocinarse durante veinte minutos en agua con sal, quedan blandos y listos para degustar.

### Salsa de soya (shoyu)

Hidrolizado de proteína de soya mezclado con harina de trigo que resulta de la acción de hongos, levaduras y bacterias.

### Sémola de soya

Producto tamizado y clasificado obtenido después de expulsar o extraer la mayor parte del aceite.

### Tempeh

La soya se remoja durante la noche y luego se cuece brevemente, ya cocida se inocula con el hongo *Rhizopus oryzae* y se deja reposar de 18 a 48 horas para obtener un crecimiento óptimo de micelas del organismo (Pascual, 1999). El producto se asa, se cocina en sopa o se fríe en aceite.

### Tofu

Producto similar al queso, hecho a partir de leche de soya. La proteína se precipita con el uso de sulfato de calcio, colocándola luego en cajas o moldes para eliminar el suero y dejar enfriar, se corta para cocerse y puede ser acompañado con shoyu.



### **4.3.- Proteína vegetal texturizada**

Empezaremos por dar una breve descripción de lo que es textura. Simbólicamente este término se refiere a la estructura interna de un cuerpo o material y a la manifestación física macroscópica de la misma.

Otra definición estricta sería en términos de percepción de las propiedades mecánicas de los materiales por medio de los sentidos, principalmente el tacto (manos, lengua, dientes, paladar), por la vista (si la superficie es lisa o rugosa) y por el oído (respuesta sonora al aplicar fuerzas a algún material) (Kearns, 2006).

#### **4.3.1.- ¿Qué es una proteína vegetal texturizada?**

La USDA<sup>11</sup> ha definido las proteínas vegetales texturizadas como “productos alimentarios elaborados a partir de fuentes de proteínas comestibles y caracterizados por poseer una integridad estructural, una textura y una estructura identificable de modo que cada unidad pueda someterse a hidratación, cocción y otros procesos habituales en la preparación de comidas” (Kilcast, 2002).

#### **4.3.2.- Otra definición de proteína vegetal texturizada**

Son ingredientes alimenticios extrudidos de fuentes proteicas comestibles, incluyendo entre otras sémola de soya, harina de soya y concentrados proteicos de soya, con o sin la adición de ingredientes opcionales apropiados para fines nutricionales o tecnológicos.

Se elaboran como fibras, tiras, trozos, pizcas, gránulos, rebanadas, y otras formas, que al prepararse para consumo mediante hidratación, cocimiento, ebullición u otros procedimientos, la proteína vegetal texturizada retiene su integridad estructural y su característica textura de masticación.

---

<sup>11</sup> USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

#### **4.4.- Aplicaciones de la proteína vegetal texturizada**

Las proteínas texturizadas se emplean en dos usos principalmente:

- Como “meat extender”, es decir ingredientes proteícos adicionales en la elaboración de productos cárnicos como las salchichas, hamburguesas, entre otros. Representan el principal consumo de este tipo de proteínas (Kilcast, 2002).
- Como “meat analog”, mediante un proceso de extrusión se puede convertir proteína vegetal como una fuente directa de elaboración de análogos cárnicos. Estos productos tienen una apariencia, textura y comportamiento en boca muy similar a la carne (Kilcast, 2002).

#### **4.5.- Ventajas de las proteínas vegetales frente a las de origen animal**

- Son menos acidificantes de la sangre, pues van acompañadas de más minerales.
- Contienen menos purinas y se eliminan mejor.
- Contienen menos grasas y son insaturadas (benéficas para la salud).
- No contienen colesterol.
- Tienen fibra.
- Sobrecargan menos el hígado y los riñones.
- Fáciles de digerir.
- Ideales para dietas bajas en calorías.
- Son baratas.

Es recomendable tomar las proteínas vegetales acompañadas de cereales ya que así se complementan y la UNP (utilización neta de proteínas) de la combinación resultante es considerablemente más alta que la de los mismos alimentos tomados individualmente.

#### 4.6.- Proceso de elaboración de proteína vegetal texturizada (PVT)

La extrusión de proteínas texturizadas es una de las muchas aplicaciones exitosas de este proceso de cocción. Existen otros métodos para producir proteínas texturizadas incluyendo el centrifugado del aislado de soya.

Con los extrusores se pueden producir análogos de carne con una similitud notable en apariencia, textura y palatabilidad a las carnes, según el proceso que se muestra en la Figura 34. La materia prima utilizada para la producción de proteínas vegetales texturizadas en un sistema de extrusión es la harina de soya desgrasada. Esta harina de soya normalmente tiene los siguientes parámetros de calidad: 50% como mínimo de proteína, 3.5% de fibra, 1.5% de grasa y un Índice de dispersibilidad de proteína (PDI) de 60 a 70 (Kearns, 2006).

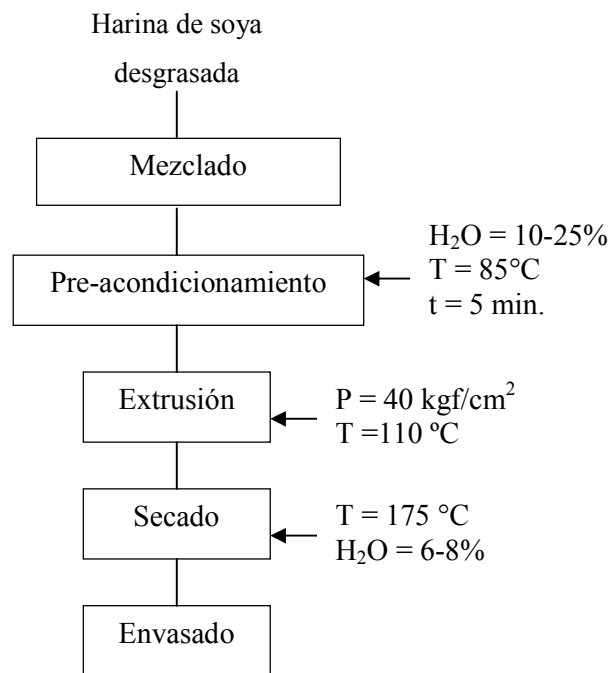


Figura. 34. Diagrama de bloques para elaborar proteína vegetal texturizada (Valls, 2003).

La harina de soya con estas especificaciones permite la producción controlada de las proteínas texturizadas en extrusores de un solo tornillo. Con el uso de extrusores de tornillo doble en el campo de la extrusión de proteínas ha incrementado las especificaciones de la harina de soya desgrasada y éstas están en los rangos de: PDI de 20 a 70, niveles de grasa 0.5 a 5 %, niveles de fibra de hasta el 0% y tamaño de partícula hasta de malla 8 (Kearns, 2006).

La Figura 35, representa un esquema de flujo típico para la producción de PVT, desde el almacenamiento de la materia prima hasta el envasado del producto final.

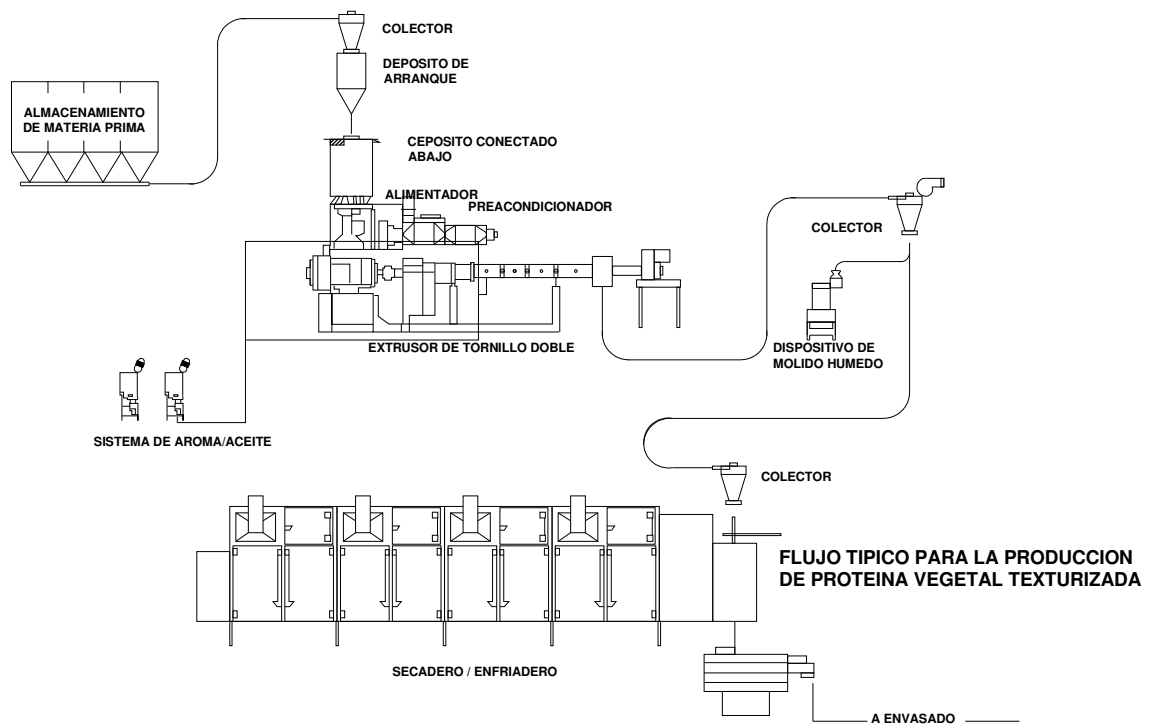


Figura. 35. Diagrama de flujo para obtener proteína vegetal texturizada (Riaz, 2004).

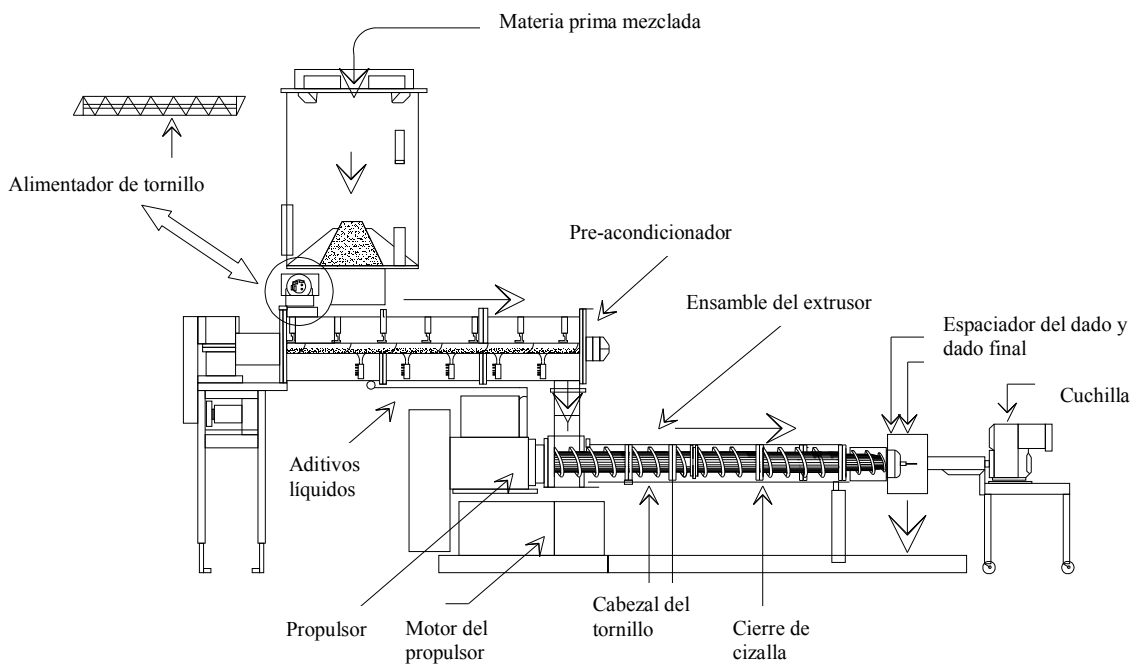


Figura. 36. Esquema del equipo extrusor del diagrama de flujo para obtener proteína vegetal texturizada (Riaz, 2004).

Las materias primas más usadas en los productos de extrusión son los cereales (maíz, trigo, arroz, avena, sorgo, cebada, triticale, entre otros), derivados de papa como harinas o gránulos y materia prima rica en proteína como la harina de soya.

Si la estructura principal del producto está formada por proteína, las materias primas usadas en el proceso se escogen entre las siguientes: soya, girasol o proteínas separadas de cereales como es el caso del gluten de trigo.

Para la formulación del producto se debe considerar cuidadosamente el aceite y la grasa que son perjudiciales para el inflado del almidón y la texturización de proteína de soya.

Los niveles máximos permitidos para adicionar grasa o aceites dentro del extrusor son del 15 a 18% para tornillos únicos y del 20 a 22% para tornillos dobles (Millar, 2006).

Es conveniente dividir a los componentes básicos de un sistema de extrusión en configuración de cilindro, el dado y ensamble de las cuchillas. El diseño de cada uno de estos componentes es elaborado para realizar una función específica en el proceso de texturizar alimentos proteínicos vegetales.

Con las opciones del diseño, las condiciones de operación se ajustan a la variedad de texturas del producto final. Un arreglo típico de los componentes de un sistema de extrusión para PVT se muestra en la Figura 36, este arreglo incluye una tolva la cual provee uniformidad a las materias primas (de naturaleza granular o harinosa) dentro del pre-acondicionador y subsecuentemente en el mismo extrusor. El flujo de materiales crudos debe ser ininterrumpido y controlado.

No todas las materias primas requieren de un pre-acondicionamiento; pero es particularmente útil cuando el tamaño de la partícula de la proteína vegetal cruda es grande (sémola u hojuelas). Este pre-acondicionamiento inicial con vapor promueve la humedad y penetración de calor en las partículas individuales en la harina de soya, resultando en una aplicación uniforme de la humedad y elevación de la temperatura en la materia prima.

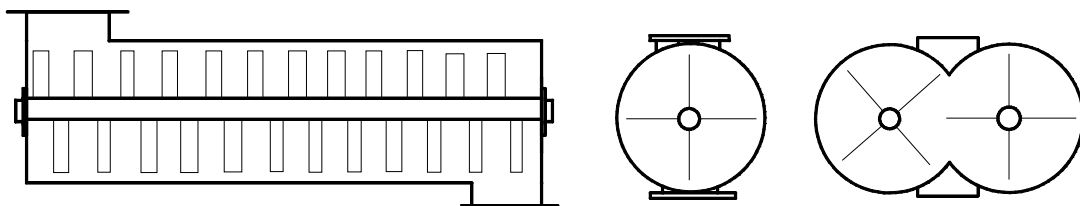


Figura. 37. Pre-acondicionadores utilizados en la extrusión de PVT (Kilcast, 2002).

Los pre-acondicionadores se purgan para evitar el exceso de vapor y permitir la eliminación de los componentes aromáticos volátiles de producciones anteriores. El pre-acondicionador es ventilado para evitar el exceso de vapor y los componentes volátiles de sabores indeseables encontrados en las proteínas vegetales crudas, ver Figura 37, estos sabores se eliminan súbitamente a medida que la proteína vegetal está siendo pre-acondicionada, o

cuando esta en el cilindro del extrusor en donde se desarrollan energías calorífica y friccional mediante los tornillos ó cuando entra en las condiciones atmosféricas en el dado del extrusor. La mayoría de los pre-acondicionadores contienen uno o dos elementos transportadores para el mezclado. El paso del material seco al pre-acondicionamiento es también una medida efectiva del inicio del control de la actividad de los inhibidores de crecimiento que se encuentran en muchas de las proteínas vegetales crudas, para este paso se pueden utilizar pre-acondicionadores atmosféricos o presurizados. Los pre-acondicionadores presurizados pueden alcanzar temperaturas más altas de descarga, pero tienen la desventaja de la destrucción potencial de nutrientes y un aumento en los costos de operación. Sin el uso del pre-acondicionamiento, es difícil elaborar proteínas texturizadas bien laminadas y estructuradas. La penetración uniforme de la humedad en los ingredientes crudos, mejora significativamente la estabilidad del extrusor y la calidad del producto final; así con el uso del pre-acondicionador, se abre el rango de utilizar materia prima con tamaños de partícula más grande sin afectar la calidad del producto final. El pre-acondicionador se descarga directamente al montaje del extrusor que consiste en la configuración del cilindro y del tornillo. Aquí, es donde se da la mayor parte de la proteína vegetal cruda pre-acondicionada, la cual modifica la textura del producto final. La sección inicial del cilindro del extrusor está diseñada para actuar como una zona de alimentación o de medición y simplemente transporta la proteína vegetal pre-acondicionada hacia el extrusor. Entonces el producto entra a la zona de procesamiento, en donde la proteína vegetal amorfa, en un flujo libre, es convertida en una masa coloidal. El radio de compresión del perfil del tornillo se incrementa en este paso para ayudar a mezclar el agua o vapor con el material crudo. La temperatura de esta masa húmeda y proteínica es elevada rápidamente en los últimos 2-5 segundos del tiempo de expansión dentro del cilindro del extrusor.

La mayor parte de este calor es de la energía mecánica que se disipa a través del tornillo que está girando y puede ser apoyada con inyección directa de vapor o de fuentes de energía externas. El perfil del tornillo puede alterarse por el armado, altura y ángulo de la trayectoria, la cual afecta el transporte de la materia alimenticia plastificada hacia el canal del tornillo. Generalmente, se debe mantener un tapón de producto entre las secciones de alimentación y de cocción para evitar el retrogolpe del vapor.

Los puntos recomendados para añadir los ingredientes, son, para el caso de ingredientes secos, usualmente se introducen dentro del pre-acondicionador que van directamente al cilindro extrusor o mediante un tornillo de alimentación si no se ensambla un pre-acondicionador. Si se trata de grasa líquida se puede mezclar con los ingredientes secos, introducir directamente al pre-acondicionador para extrusores de tornillo único ó directamente al cilindro del extrusor solamente para tornillo doble.

El agua de proceso y el vapor de proceso se deberán introducir en el pre-acondicionador o en el cilindro extrusor utilizando medidores manuales de flujo. El tiempo de retención de 5-15 segundos a temperaturas de 100 a 200°C y con niveles de humedad del 15-30% influyen en la calidad de la masa de proteína justo detrás del dado y la granulación del producto final (Kearns, 2006). La temperatura en este punto derrite a la proteína en una masa visco-elástica plastificada, teniendo altas viscosidades, la desnaturalización o unión entrelazada puede ser considerada como una reacción endotérmica irreversible, el extendido de la unión entrelazada parece estar en función del tiempo, temperatura y humedad y puede estar relacionada con cambios aparentes en la viscosidad del producto extrudido (Kilcast, 2002).

Se emplean aditivos tales como aromas, saborizantes, modificadores de pH, emulsificantes, surfactantes, gluten de trigo, colorantes, potenciadores de aroma, conservadores, entre otros. Estos aditivos pueden introducirse en la fase de mezclado del proceso, para asegurar un mezclado continuo y completo de todas las sustancias alimenticias que entran al cilindro del extrusor, con esto se permite ajustar las características texturales, de sabor y consistencia.



Los biopolímeros naturales desempeñan un papel muy importante en la formación de la estructura de los productos extrudidos. Normalmente proporcionan una mezcla fluida de polímeros a altas temperaturas. Esta mezcla es continua y a la cual se unen todas las demás partículas de las fases dispersas que ayudan a retener los gases liberados durante el proceso de granulación. A medida que la estructura del producto se calienta y se vuelve fluido, fluye bajo la alta presión interna generada por el vapor de agua y se formarán burbujas que salen en forma granular amorfa al pasar por el dado, la formación de estas burbujas es muy importante en la textura final del producto, cuanto mayor sea la nucleación de los biopolímeros mas fina es la textura, sin embargo, si los gránulos del almidón se dispersan muy rápido en el proceso de extrusión, la nucleación se reduce y se refleja en un texturizado tosco (Riaz, 2004)

Este material es extrudido a través de la apertura del dado y ocurre la granulación cuando el producto es liberado hacia las presiones ambientales. Los dados para las proteínas vegetales texturizadas deben tener un flujo de línea de corriente que no rasgue o cause efectos de cizalla en las moléculas de proteína ya laminadas. Se refiere a que el diseño del dado sea específico para la proteína vegetal texturizada, considerando también la forma y tamaño del producto final, se debe aclarar que la proteína vegetal texturizada no infla como los cereales para desayuno, si su función es la de granularse de manera amorfa es por que la proteína no presenta los fenómenos de absorción de agua, hinchado del granulo y dextrinización, esto es debido a que la harina de soya no es rica en almidón.

El uso de ingredientes crudos ha sido restringido y éste es un factor limitante para el uso de extrusores de un solo tornillo. Su uso requiere materia prima de buena calidad y uniforme, y un programa de mantenimiento para las partes del cilindro.

El cilindro del extrusor de doble tornillo, usado generalmente en la industria alimentaria, consta de un par de tornillos co-rotativos, y mallas intercaladas auto limpiables, debido a las mallas intercaladas de los tornillos, cada uno de los tornillos tiene restricciones en su diseño. Están limitados en el perfil de la trayectoria y el diámetro de la base.

Los tornillos están segmentados para que su disposición pueda ser modificada, el diseño del cilindro de doble tornillo tiene la ventaja, de una característica positiva, para un mejor llenado, que el diseño del cilindro de un solo tornillo. Como resultado del diseño del extrusor de doble tornillo, las especificaciones de la materia prima son menos estrictas.

Los extrusores de tornillo único pueden manejar materias primas con concentraciones máximas de 4% en grasa, 10% en azúcares y 30% humedad, mientras que en los extrusores de tornillo doble estos valores ascienden al 20%, 40% y 65% respectivamente (Sánchez, 2003).

En cualquiera de los casos de tornillo sencillo o doble, la combinación del pre-acondicionado y el arreglo del cilindro del extrusor da como resultado la modificación de la materia prima para obtener proteínas texturizadas.

La hidratación y el calor causan el desdoblamiento de las moléculas de proteínas vegetales largas y en forma de espiral, en el proceso de extrusión estas moléculas se auto alinean junto con el flujo de la línea de corriente del cilindro del extrusor, tornillo y dados. El incremento en la temperatura de cizalla y tiempo de retención causan una unión entrelazada, obteniendo un producto texturizado.

En el proceso de extrusión de las proteínas texturizadas el contenido de humedad se eleva. Al producto cocido se le debe disminuir la humedad para un almacenamiento seguro antes de ser consumido. La adecuada selección en el diseño y tamaño del secado-enfriador es importante para la elaboración de productos de buena calidad, y también para el costo global de la producción, debido a que este paso es generalmente el más costoso. El secador-enfriador tipo bandeja (Figura 38), es el estilo más popular para la producción de proteína de soya texturizada.

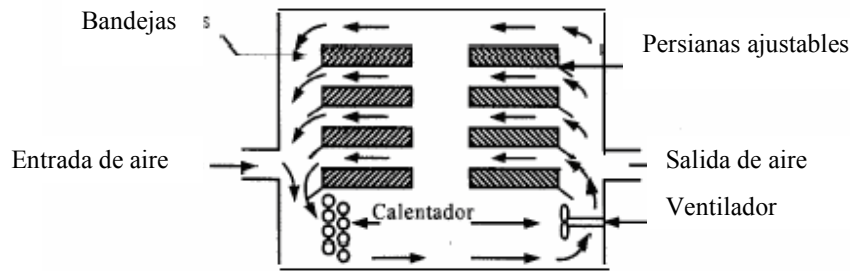


Figura. 38. Esquema típico de un secador de bandejas (Geankoplis, 1998).

La humedad se reduce mediante la evaporación, que de hecho enfría el producto extrudido. Se da una reducción de la humedad de 4 a 7% (Kill & Turnball, 2004), el secado adicional se puede dar atmosféricamente o mediante un secador de bandejas.

Los secadores-enfriadores pueden ser contruidos con diversos largos, anchos, materiales, estilos de transportación, flujo de aire, consideraciones sanitarias y sistemas de calentamiento. La habilidad para construir los secadores-enfriadores con diferentes largos y anchos permite obtener tamaños adecuados del producto resultante del extrusor y también ofrece flexibilidad en la integración del equipo en instalaciones nuevas o ya existentes. El diseño de la malla tamiz tiene una área abierta mayor para que el flujo de aire permita que las pequeñas partículas se sequen y queden retenidas en el transportador.

El flujo de aire es generalmente montado en una cámara sencilla encima de los ventiladores de aire. Estos ventiladores de recirculación crean una presión estática por debajo de las bandejas del secador, resultando en un secado uniforme en la cama de producto.

Un porcentaje de aire es expedido para controlar la humedad en el secador, mientras el balance es recirculado, lo que permite una máxima eficiencia en el consumo de energía.

El completo aislamiento de todos los lados del secador acoplados con los sistemas de calentamiento permite una operación segura a temperaturas de hasta 350°F (175°C) (Geankoplis, 1998). Los secadores están normalmente equipados con enfriadores integrados. El flujo de aire pasa generalmente por debajo del producto y el porcentaje de éste que se escapa es usado como aire del secador, teniendo un secador más eficiente y una reducción en el gasto de energía.

#### **4.7.- Aditivos en la proteína vegetal texturizada**

La adición de los ingredientes minoritarios o de ajuste químico de la materia prima de la proteína vegetal texturizada puede incrementar varios aspectos de los productos finales y reducen las restricciones de especificación de algunas materias primas.

##### Ajustes en el pH

Un incremento en el pH de las proteínas vegetales antes o durante el proceso de extrusión ayuda en la texturización de la proteína. Modificando el pH por arriba de 8.0 puede resultar en la producción de lisoalaninas dañinas (Fennema,1993). Bajando el pH se produce el efecto opuesto y disminuirá la solubilidad de la proteína, haciendo a la proteína más difícil de procesar. Los sabores agrios indeseables en las proteínas vegetales texturizadas pueden hacerse evidentes, si el pH es ajustado arriba de 5.0 se modifica hacia el lado alcalino y se incrementará la absorción de agua. Esto se realiza generalmente utilizando Hidróxido de Calcio o Hidróxido de Sodio, que es más ampliamente utilizado al 0.1% aproximadamente o según se requiera (Vicente, 2000).

##### Alginato sódico

Con la adición de este compuesto se aumenta la masticabilidad, la capacidad de retención de agua y la densidad de los productos proteínicos extrudidos.

##### Cloruro de calcio

El Cloruro de Calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) es muy efectivo para el incremento de la integridad textural de las proteínas vegetales extrudidas y también ayuda para suavizar la superficie. Los niveles de adición del  $\text{CaCl}_2$  son entre 0.5 y 2.0 %. Con la adición de  $\text{CaCl}_2$  y pequeñas cantidades de azufre, la pasta de soya que contiene 7.0 % de fibra puede ser texturizada

(Vicente, 2000). El producto resultante de un proceso de una hora de duración a 110°C sigue manteniendo una textura dura parecida a la carne.

El Cloruro de Sodio (NaCl) no parece añadir ningún beneficio en la textura de las proteínas vegetales extrudidas.

#### Lecitina de soya

Cuando la lecitina es añadida hasta en un 0.4% tiende a suavizar el flujo laminar en la configuración del cilindro y del dado del extrusor, lo cual permite la elaboración de productos con mayor densidad (Riaz, 2004). La habilidad para hacer productos de proteínas vegetales más densos, está relacionada con un alto grado de unión entrelazada que ocurre durante el proceso de extrusión.

#### Azufre e ingredientes que contienen azufre

El azufre es conocido por su habilidad para ayudar en la ruptura de las uniones disulfuro, lo cual ayuda al desdoblamiento de las moléculas largas, en forma de espiral de las proteínas. Esta reacción con las moléculas de proteínas causa un incremento en la granulación, una superficie del producto más suave y añade estabilidad al proceso de extrusión. Estos beneficios, sin embargo, conllevan ciertos efectos laterales no deseables que incluyen: disminución del sabor y el aroma. El metabisulfito de sodio y el bisulfito de sodio, como la cisteína, pueden ser utilizados con efectos similares a los del azufre. Los niveles de dosis normales de azufre o derivados del azufre son de 0.01 a 0.2 %. La cisteína se utiliza aproximadamente a un nivel del 0.5 a 1 % (Vicente, 2000).

#### Modificación del color

Los agentes blanqueadores, como el peróxido de hidrógeno, se utilizan para este propósito. Los niveles de adición van de 0.25 a 0.5%. Los pigmentos como el dióxido de Titanio son usados en niveles del 0.5 a 0.75% para aclarar el color, pero en mayores niveles debilitarán a las proteínas vegetales extrudidas (Igoe, 1998).

#### **4.8.- Parámetros de Control de Calidad aplicados a las proteínas vegetales texturizadas**

Las proteínas texturizadas son un producto único, durante su elaboración se controlan varias propiedades funcionales tales como la densidad, grado y tiempo de retención, forma, apariencia y palatabilidad, estas propiedades son muy importantes al momento de extrudir la materia prima ya que de ello depende el éxito o fracaso del producto ante el consumidor, por lo que estas especificaciones deben de estar controladas por los parámetros de calidad que se mencionan a continuación.

##### Índice de dispersibilidad de proteína

El Índice de Dispersibilidad de Proteína (PDI por sus siglas en inglés), es el porcentaje del total de la proteína que es dispersable en agua, bajo condiciones controladas de extracción. Actualmente el PDI es una medida preferida, debido a las especificaciones de la materia prima, y es más confiable comparado con el Índice de Solubilidad de Nitrógeno (NSI por sus siglas en inglés). Los productos de soya texturizada han sido producidos a través de materia prima con un IDP de 50 a 70, cuanto mas alto sea el número de IDP, mejor es el producto final (González, 2006).

##### Nivel de grasa

La materia prima ha sido texturizada conteniendo un nivel de grasa del 0.5 a 6.5% (Kearns, 2006). Este rango tan alto de grasa, permite la extracción mecánica de la pasta de soya para ser texturizada en extensores y análogos de carne.

Cuando el material que se va a extrudir tiene mayores niveles de grasa se puede decir generalmente que hay un incremento en el gasto de energía de cizalla y se requieren mayores temperaturas para mantener la integridad del producto deseado.

##### Nivel de fibra

Los niveles de fibra pueden estar en el intervalo de 0.5 a 7.0% (Kearns, 2006), la presencia de fibra en la proteína de soya extrudida inhibe o bloquea la interacción o unión entrelazada de las moléculas de proteína necesaria para una buena integración de la textura. Cambiando la configuración del extrusor para impartir más cizalla a las proteínas de soya que contienen mayores niveles de fibras, se puede alcanzar un producto final con propiedades texturales

similares a las de las proteínas de soya con menores niveles de fibra. Algunas materias primas pueden ser tanto finas de 38 micrones como gruesas de más de 180 micrones, las harinas muy finas al humedecerse se aglomeran y las harinas muy gruesas son difíciles de prehumedecer, por tanto se recomienda un intervalo de 150 a 45 micrones.

#### Tamaño de partícula

Las limitaciones para el uso de extrusores de tornillo único, son las siguientes: el uso de harina muy fina, por abajo de malla 400 (38 micrones), debe ser limitado debido a problemas que se presentan, si se moja este polvo fino formaría grumos; también productos muy gruesos, mayores a malla 80 (180 micrones) requieren un pre-acondicionamiento y algunas veces se ven gránulos enteros en el producto terminado.

Por lo tanto se recomienda que el 95% de la molienda del producto pase por una malla 100 (150 micrones) y un máximo del 50% pase por una malla 325 (45 micrones) para harina de soya desgrasada. Los extrusores con tornillos doble, pueden, algunas veces, utilizar materia prima con un tamaño de partícula de hasta malla 8 (2360 micrones) sin afectar las propiedades de textura del producto final. El pre-acondicionamiento es una relación entre tiempo, temperatura y nivel de humedad en el producto durante la extrusión y al producto final.

#### Niveles de proteína

El porcentaje de proteína normalmente es inversamente proporcional a los constituyentes restantes de la materia prima, tales como la grasa y fibra. Por ejemplo, el contenido de proteína de la soya aumenta cuando el aceite y la cascarilla se remueven. Por lo tanto, cuando el nivel de la proteína de la materia prima disminuye, la integridad textural y la capacidad de retención de agua disminuye y la densidad de la masa del producto final aumenta.

#### 4.9.- Costos de la proteína vegetal texturizada

Tabla. 13. Variedad de precios y presentaciones de PVT en diferentes tiendas departamentales

<b>Tienda departamental</b>	<b>Costo (\\$)</b>	<b>Gramaje (kg)</b>	<b>Variedad de PVT</b>
Gigante	26.90	0.330	PVT estilo rancharo
Comercial Mexicana	16.00	1.0	PVT natural a granel
Walmart	21.00	0.450	Preparada para consumo inmediato.
	24.50	0.180	PVT natural Sabor: res y pollo
Chedraui	15.00	1.0	PVT natural
Soriana	8.50	0.330	PVT natural Sabor: res y pollo
Central de Abastos	12.00	1.0	PVT natural a granel

Las proteínas de soya son la fuente más grande para la elaboración de productos texturizados. Esto es debido a la simple ley económica de la oferta y la demanda. La oferta de soya en el mundo entero es abundante, y globalmente, es una fuente de proteína barata y relativamente fácil de procesar.

En todo proceso productivo-comercial, en el concepto de norma de calidad engloba una serie de requerimientos básicos que todo producto debe reunir, y los cuales están previamente establecidos, permitiendo con ello la unificación de criterios en torno a las calidades de los productos, lo que traerá consigo un mayor nivel de satisfacción para el consumidor.



La soya ha sido uno de los productos que ha registrado un importante crecimiento en su uso para la agroindustria en México, trátase en la elaboración de alimentos para animales, productos de consumo humano y materia prima para otros procesos industriales. En la Tabla 13, se muestra una investigación económica haciendo referencia a las variedades de proteína vegetal texturizada que se comercializan en las diferentes tiendas departamentales, se observa la difusión de este producto para su consumo, sin embargo, el costo establecido puede implicar la deserción por adquirir estos productos.

Esta oleaginosa para la industria de alimentos balanceados y del sector pecuario ha sido presurosa, esto se fundamenta porque la mayoría de las industrias alimenticias, utilizan la soya como materia prima o como ingrediente de sus formulaciones por sus propiedades funcionales y por que dá grandes rendimientos en los productos, en especial cuando se trata de la industria cárnica, como el ligar agua y grasa, estabilizar las emulsiones, asegurar la integridad estructural de las emulsiones, aportar textura, mejorar el color y sobre todo por ser un alimento económico, nutritivo y saludable.

Existen aproximadamente 4,200,000 almacenes detallistas en todo el territorio mexicano que venden alimentos y bebidas, cifra que incluye a las grandes cadenas de supermercados, tiendas de conveniencia y almacenes especializados, pero que excluye a pequeñas tiendas de barrio y ventas callejeras no registradas (Planeta soja, 2008). Las principales cadenas de supermercados vienen realizando importantes inversiones en sofisticados sistemas de distribución que garantizan una mayor cobertura geográfica y un adecuado arribo de sus productos a los diversos y distantes puntos de venta. Como se observa en la Figura 39 estas cadenas de comercio originan una gran variedad de productos, específicamente de soya, partiendo del campo donde se hace una distribución rural del producto en la misma zona, su consumo es inmediato en los hogares, al mismo tiempo pasa por diferentes márgenes de comercialización, en donde los usos de esta oleaginosa van desde los adornos ornamentales hasta la industrialización que se deriva en diferentes productos, con esta variedad se hace mas factible el consumo de la proteína de soya, lo único preponderante por realizar es hacer una gran mención de su consumo en función del costo establecido a los productos.

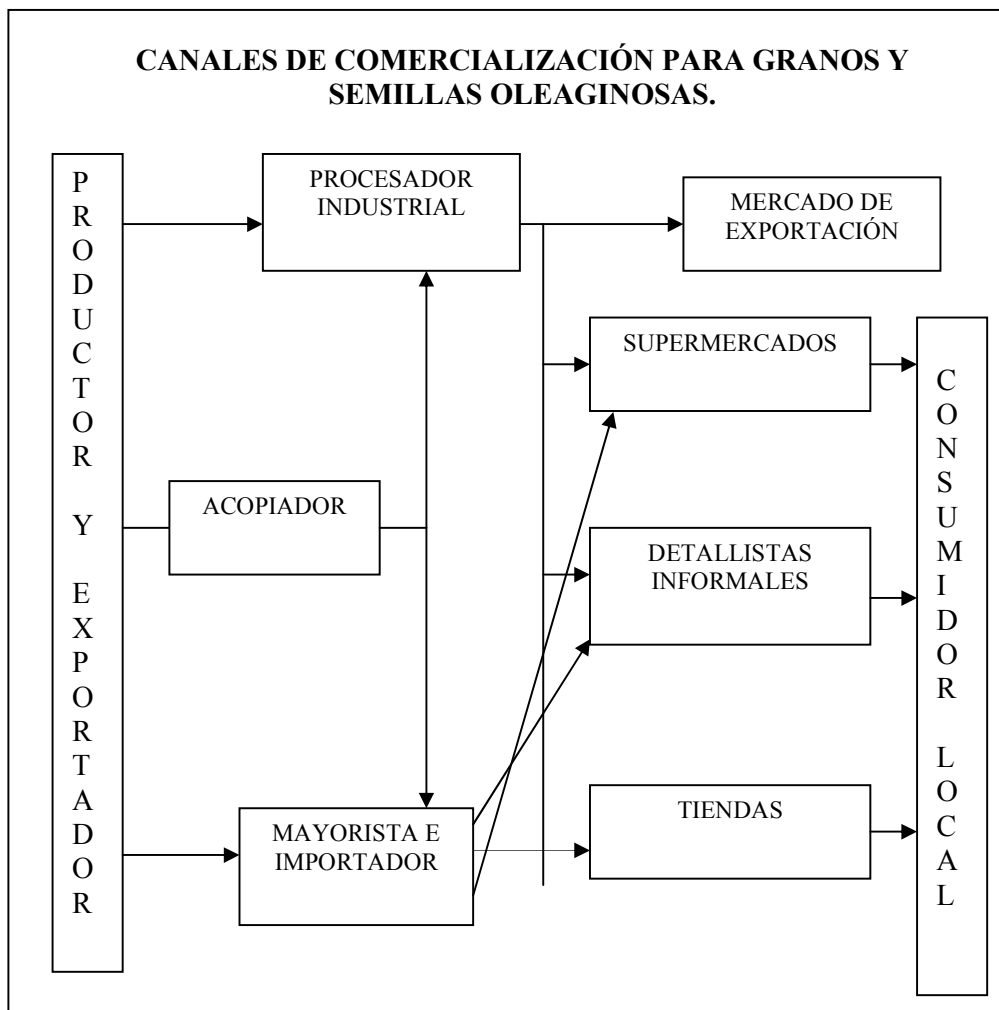


Figura. 39. Canal de distribución básico y márgenes de comercialización (Planeta soja, 2008).

Las tiendas de autoservicio y departamentales se encuentran agrupadas en la Asociación Nacional de Tiendas de Autoservicio y Departamentales, (ANTAD). Con excepción de Walmart de México quien no se encuentra afiliada a esta asociación, y defiende los intereses de sus asociados de manera independiente. Las tiendas de autoservicio y departamentales, geográficamente se encuentran distribuidas en siete zonas definidas por la ANTAD, como se muestra en la Tabla 14:

Tabla. 14. Zonas ANTAD (Fuente ANTAD)

<b>Zona geográfica ANTAD</b>	<b>Estados que comprende</b>
Metropolitana	Distrito Federal y Estado de México
Centro	Aguascalientes, Colima, Hidalgo, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Querétaro y Sn. Luis Potosí
Norte	Coahuila, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Nuevo León y Tamaulipas
Noreste-Noreste	B.C. Norte, B.C. Sur, Nayarit, Sinaloa y Sonora
Sureste-Sureste	Campeche, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz, Yucatán, Guerrero, Chiapas y Oaxaca

Así las empresas han seguido la práctica de realizar alianzas estratégicas y de comercialización de granos, oleaginosas y subproductos, y en México las empresas disponen de plantas procesadoras que también se desempeñan como vendedores y comercializadores de granos oleaginosos, así la disponibilidad del producto es grande solo resta hacer mas énfasis en el consumo del frijol de soya y sus derivados.

## CONCLUSIONES

Es la soya el único cultivo totalmente mecanizado que ofrece una alternativa viable para una producción racional y sostenida en el tiempo, basada en la rotación de cultivos, garantizando al productor un alto nivel de rentabilidad, la conservación y mejoramiento de un recurso natural renovable como lo es el suelo.

La demanda de productos texturizados de proteína vegetal continuará en aumento por la infinidad de aplicaciones en la industria de alimentos, por otro lado los consumidores son más conscientes del carácter nutritivo de los alimentos que ingieren, por lo que los productos derivados de la soya son una vía aceptable, que pueden ser adquiridos sin importar edad ó condición física de las personas. El consumo de productos de soya ha sido relacionado a muchos beneficios para la salud, esta semilla puede proteger contra diferentes tipos de cáncer y otras enfermedades (Soy, isoflavones and breast cancer risk in Japan, 2003).

La soya se considera una leguminosa rica en nutrientes que aporta una vasta necesidad de aminoácidos, fibra, lípidos y principalmente proteínas, que sí solo se consumiera la semilla o sus derivados, sería suficiente para el metabolismo, los efectos no benéficos que también se desencadenan por el consumo de estos productos, se producirían únicamente cuando la soya y sus derivados no son parte de una dieta equilibrada.

De igual manera, es cierto que algunas de las ventajas que aporta la extrusión pueden conseguirse por otras vías, pero también las alternativas son específicas y no poseen la diversidad de aplicaciones de la extrusión.

Así la extrusión ofrece un amplio abanico de posibilidades, tanto para el tratamiento de materias primas como para el tratamiento de otros productos aplicados en los diferentes giros como son la alimenticia, farmacéutica y química, la extrusión aplicada en alimentos cuando ocurre la cocción, que casi es instantánea, provoca un daño mínimo a los factores nutricionales sensibles al calor, por esta razón no es muy necesario que a los productos extrudidos se les tengan que enriquecer o adicionar con compuestos nutricionales, esta puede ser la razón de que el proceso de extrusión sea bajo en cuanto a costos de producción.

## RECOMENDACIONES

En cuanto a las consideraciones de seguridad para el uso de una máquina extrusora podemos mencionar las siguientes:

### Riesgos eléctricos

El proceso de extrusión utiliza numerosos motores eléctricos, calentadores, sistemas de control, etc. Las precauciones normales de seguridad en cuanto a electricidad deben ser observadas. No hay ningún riesgo especial que se considere inherente a la extrusión.

### Riesgos térmicos

Los extrusores de cocción pueden calentarse mucho. Esto puede ser un problema cuando es necesario dar servicio a la máquina durante su operación, y deben tomarse precauciones cuando se manejan partes como las placas del dado, guantes aisladores deben estar disponibles. De otra forma los extrusores no representan ningún problema particular en esta área.

### Riesgos mecánicos

Con un número de partes que rotan, las navajas cortadoras y otras partes de la máquina que son móviles, los extrusores tienen los riesgos normales encontrados en la mayoría de los ambientes industriales.

### Interferencia mecánica

La introducción de materiales de interferencia en las partes en movimiento de la máquina debe ser evitada para prevenir roturas y peligro de piezas sueltas. Esto es de suma importancia a nivel del alimentador del extrusor, el cual frecuentemente está abierto.

### Fallo mecánico

Aún sin una interferencia específica, las partes de la máquina pueden quebrarse mientras se mueven rápidamente. En extrusión, las cuchillas cortadoras son particularmente propensas a fallo, y deben ser reemplazadas con frecuencia. Cuando se quiebran, se convierten en proyectiles potenciales que pueden ser mortales.

### Riesgo gravitacional

Aunque parezca trivial mencionarlo, la mayoría de lesiones que se ven en extrusión, han involucrado la fuerza de gravedad. Las partes del extrusor pueden ser pesadas, difíciles de manipular y frecuentemente calientes, haciéndolas potencialmente peligrosas a aquéllos que les dan servicio a las máquinas.

### Riesgos de fuego

La combustión puede ocurrir en dos áreas: en el sistema eléctrico, y por la acumulación de la parte fina del producto (polvo). Los problemas eléctricos no son particularmente problemáticos en extrusión, siguiendo las reglas normales de seguridad para las instalaciones eléctricas. Un riesgo particular en extrusión, sin embargo, es la presencia de polvo de productos combustibles los cuales pueden acumularse en áreas peligrosas como las unidades de calentamiento eléctricas.

### Fallo catastrófico del dado

Los dados frecuentemente diseñados por el comprador del extrusor, deben soportar una presión elevada. Un fallo común está causado por agregar muchos orificios a una placa del dado sin considerar la fuerza. Este es un problema particular en dimensionamiento a escalas mayores, en donde el número de orificios aumenta con el cubo del diámetro del extrusor, pero la circunferencia del círculo del dado aumenta linealmente, atascando el dado.

### Sobrecarga explosiva

La operación inestable puede llevarnos a explosión, especialmente al encendido. Ocasionalmente la explosión puede ser extrema, causando que el extrusor emita un chorro de producto caliente y vapor.

La OMS (Organización Mundial de la Salud) afirma en sus estudios que el mundo desarrollado consume más del doble de los requerimientos diarios necesarios en proteínas. Mientras, el tercer mundo sufre una carencia alarmante de proteínas, por otro lado, incluso la OMS recomienda una proporción de 25% de proteína animal y un 75% de proteína vegetal en la dieta humana. Esto es debido porque al consumir grandes cantidades de carnes rojas, o de otros alimentos como el tocino o chorizo, son una fuente grande de grasas que ocasionan el aumento del colesterol y/o de los triglicéridos, solo por mencionar algunas alteraciones en el metabolismo; por lo que el consumo de la proteína vegetal se recomienda en cantidades superiores, cabe aclarar que no se pretende con este trabajo querer modificar la dieta de las personas, solo es una propuesta para mantener una mejor condición metabólica, equilibrada y vasta de nutrientes que ayuden a mantenerse en mejores condiciones y a la vez poder contribuir a la prevención de enfermedades crónicas.

Las siguientes recomendaciones son para prevenir con el consumo de proteína vegetal texturizada y los derivados del frijol de soya, ciertos trastornos que aquejan a las mujeres a lo largo de su vida. Según la revista especializada en beneficios de la soya, cada porción se recomienda aproximadamente de 2-5 gramos (Soy, isoflavones and breast cancer risk in Japan, 2003).

- Para la incomodidad de los bochornos y la resequedad: 1 a 2 porciones
- Para disminuir el riesgo de cáncer de mama: 1 a 2 porciones
- Para reducir el riesgo de males del corazón o ataques de parálisis: 2 a 5 porciones
- Para fortalecer los huesos: 3 a 8 porciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ASA (Asociación Americana de Soya). (2008). Disponible en:  
<http://www.soyamex.com.mx>
2. Baquero, J. (1985). *Equipos para la Industria Química y Alimentos*. Madrid, España: Alambra.
3. Baquero, J. (1988). *Extracción de aceite de semillas oleaginosas*. Madrid, España: Alambra.
4. Badui, S. (1993). *Química de los Alimentos*. Madrid, España: Pearson Educación.
5. Burns, R. (1996). *Fundamentos de Química*. México: Pearson Educación.
6. Brennan, J.G. & Butters, J.R. (2000). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. Zaragoza, España: Acribia.
7. Callejo, G. M. (2002). *Industrias de cereales y derivados*. España: Mundi Prensa.
8. Cambero, M. I. (1998). *Tecnología de los alimentos, Componentes de los alimentos y procesos*. Madrid, España: Síntesis.
9. Capilla, V. (2006). *Selección de ingredientes: preparación de materias primas*. España: Ainia Centro Tecnológico.
10. Extrusión y sus elementos básicos. (2007). Disponible en:  
<http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusion>
11. Fellows, P. (1994). *Tecnología del procesado de los alimentos, principios y prácticas*. Zaragoza, España: Acribia.
12. Fennema, O. (1993). *Química de los alimentos*. Zaragoza, España: Acribia.
13. Ferlini, M. H. (2005). *Efectos de la fertilización y la coinoculación con bacterias PGPRs (*bradyrhizobium japonicum* + *Azospirillum brasilense*) en el cultivo de soja*. Córdoba, Argentina.
14. Fox, M. (2000). *Química orgánica*. México: Pearson Educación.
15. Geankoplis, J. (1998). *Transport processes and unit operation*. Nueva York: Continental.
16. González, P. (2006). *La pasta y harina de soya en la producción de los alimentos balanceados en México*. Claridades Agropecuarias 08, 01-19.
17. Guy, R. (2002). *Extrusión de los alimentos*. Zaragoza, España: Acribia.



18. Ghebre, S. & Charles, M. (2004). *Pharmaceutical Extrusion Technology*. Marcel Dekker, INC. NY.
19. Horst, D. (2001). *Fundamentos de Tecnología de los Alimentos*. Zaragoza, España: Acriba.
20. Industrial de alimentos S.A. (2007). México. Disponible en:  
<http://www.protoleg.com.mx>
21. Igoe, S. (1998). *Diccionario de ingredientes alimentarios*. México: AGT.
22. Ínter química S.A de C.V. (2007). México. Disponible en:  
<http://www.interquimica.com.mx>
23. Kearns, P. (2006). *Expresión de proteínas Texturizadas*. Kansas City Missouri. Para la Oficina Regional México, Centro América y el Caribe.
24. Kilcast, D. (2002). *Texture in food*. Vol. 2. Cambridge, England: Avebe.
25. Kill, R.C. & Turnball, K. (2004). *Tecnología de la elaboración de pasta y sémola*. Zaragoza, España: Acribia
26. Miller, C. R. (2006). *Operaciones unitarias en procesos de extrusión*. Aurbururn, NY. Para la Oficina Regional México, Centro América y el Caribe.
27. McCabe, W. (2000). *Unit operations of chemical engineering*. New York: Mc Graw Hill.
28. McKenna, M. (2003). *Texture in food*. Vol. 1. Cambridge, England: Avebe.
29. OMS (Organización Mundial de la Salud). (2008). Disponible en:  
<http://www.oms.org>
30. Pané, R. (2003). *El proceso de extrusión en cereales y habas de soja*. Cooperativa D'Ivars. IX Curso de especialización FEDNA. Barcelona, España.
31. Pascual, M. (1999). *Microbiología de los alimentos*. España: Díaz Santos.
32. Planeta Soja. (2008). Disponible en:  
<http://www.planetasoja.com>
33. Reverter, G. (2006). *Revisión de aplicaciones de extrusión*. España: Ainia Centro Tecnológico.
34. Riaz, N. (2004). *Extrusores en las aplicaciones de alimentos*. Zaragoza, España: Acriba.
35. Rokey, G. (2005). *Tecnología de la Extrusión e Implicaciones Nutricionales*. XI Curso de especialización FEDNA. Barcelona, España.

36. Rosenstein, S. (2005). *Diccionario de Especialidades para la Industria Alimentaria*. México: Científica PLM.
37. Salud y beneficios que aporta la soya. (2007). Disponible en: <http://www.infoagro.com>
38. SAGARPA. (2008). *cultivo de soya*. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx>
39. Sánchez, M. (2003). *Procesos de elaboración de alimentos y bebidas*. España: Mundi-Prensa.
40. Souci Fachmann, K (1999). *Tablas de composición de alimentos*. Zaragoza, España: Acribia.
41. Soya texturizada. (2007). Disponible en: <http://www.fiagro.org.sv/systemFiles>
42. Soy, isoflavones and breast cancer risk in Japan. (2003). *Journal of the National Cancer Institute* 12, 906-913.
43. Sharma, S. (2003). *Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. Nueva York: Limusa.
44. Tunghai, W. (2000). *Co-rotating Twin-screw Extruders*. Nueva York: Rapra Technology.
45. Valls, P. (2003). *El proceso de extrusión en cereales y habas de soja efecto de la extrusión sobre la utilización de nutrientes*. IX Curso de especialización FEDNA. Barcelona, España.
46. Vicente, A. (2000). *Los aditivos en los alimentos*. España: Mundi Prensa.
47. William, G. (1996). *Química*. México: Pearson Educación.
48. Yufera, E. (1998). *Química de los Alimentos*. Madrid, España: Síntesis.