



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

---

---

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**ÁREA ACÁDEMICA DE QUÍMICA**

**LICENCIATURA DE QUÍMICA EN ALIMENTOS**

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y NUTRICIONAL DE  
UNA BOTANA EXPANDIDA POR EXTRUSIÓN ADICIONADA  
CON CEBADA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADA DE QUÍMICA EN ALIMENTOS**

**PRESENTA**

**DIANA ISELA BARRERA BARRERA**

**DIRECTORES**

**DRA. FABIOLA ARACELI GUZMÁN ORTIZ**

**DRA. ALMA DELIA ROMÁN GUTIÉRREZ**

**DR. EDUARDO MORALES SÁNCHEZ**

**QA**

**QUÍMICA EN ALIMENTOS**

**PACHUCA DE SOTO, HIDALGO, 2018**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Institute of Basic Sciences and Engineering  
Dirección  
Dean

Mineral de la Reforma, Hgo., a 13 de abril de 2018

Número de control: ICBI-D/339/2018  
Asunto: Autorización de impresión.

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO  
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

Por este medio le comunico que el Jurado asignado a la Pasante de Licenciatura en Química en Alimentos **Diana Isela Barrera Barrera**, quien presenta el trabajo de titulación **“Caracterización fisicoquímica y nutricional de una botana expandida por extrusión adicionada con cebada”** después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación firman de conformidad los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE:	Dra. Eva María Santos López
PRIMER VOCAL:	Dra. Fabiola Araceli Guzmán Ortiz
SEGUNDO VOCAL:	Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa
TERCER VOCAL:	Dra. Alma Delia Román Gutiérrez
SECRETARIO:	Dr. Javier Castro Rosas
PRIMER SUPLENTE:	Dra. María Luisa Rodríguez Marín
SEGUNDO SUPLENTE:	Dra. Esmeralda Rangel Vargas

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente  
“Amor, Orden y Progreso”

Dr. Óscar Rodolfo Suárez Castillo  
Director del ICBI



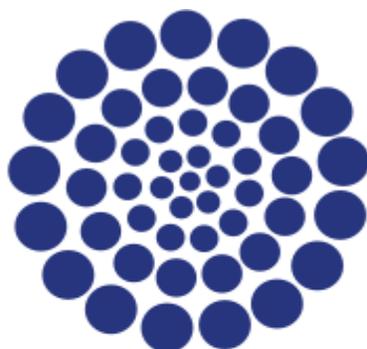
Ciudad del Conocimiento  
Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
Colonia Carboneras  
Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 4218  
Tef. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109  
direccion\_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx



## **QUÍMICA EN ALIMENTOS**

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Alimentos II del Centro de investigaciones Químicas (CIQ) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.



**CONACYT**

*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*

Este trabajo de investigación se realizó con el apoyo del proyecto de cátedras CONACYT 1232 de “Nuevos productos innovadores que impacten a la salud del consumidor y a la industria alimentaria”.

## **DEDICATORIAS**

Dedico esta tesis en primer lugar a mi persona, por el reto cumplido, por demostrarme que querer es poder, por las fuerzas y ganas que reflejan este trabajo. En segundo lugar, a todos aquellos que me apoyaron moral y económicamente: mis padres quienes me dieron vida, educación y consejos. Mis hermanos y hermanas, compañeros de estudio, maestros y amigos, quienes creyeron en mí. A todos los que supusieron que lo lograría, a todos ellos les dedico esta tesis.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias, por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.

A mis padres, por su apoyo incondicional, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación. Y por ser mí ejemplo en la vida.

A mis hermanos y hermanas, por ser parte importante en mi vida, por apoyarme en aquellos momentos de necesidad y por haber creído en mí hasta el último momento.

A la Dra. Fabiola Guzmán, por su orientación y atención a mis consultas, sus valiosas sugerencias en momentos de duda. Por su paciencia y haber compartido conmigo sus conocimientos.

A la Dra. Alma Delia Román, por el material facilitado y las sugerencias recibidas. Por su valioso tiempo y contribuir a mi formación como profesional.

Al Dr. Eduardo Morales, por su aportación de valiosos conocimientos. Por su tiempo y permitirme realizar ensayos valiosos de este trabajo en su área de investigación.

Agradezco a la Dra. Eva María Santos y al Dr. Javier Añorve, por todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera, por sus consejos, enseñanzas y conocimientos transmitidos.

A mis amigos, por los buenos recuerdos, por las tareas que juntos realizamos, por compartir sus conocimientos conmigo, por su apoyo moral y humano.

A mis sinodales quienes estudiaron mi tesis y la aprobaron.

Agradezco a Ciro Baruchs por su apoyo en la realización de algunas determinaciones para este trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	I
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	II
<b>GLOSARIO</b> .....	III
<b>TERMINOLOGÍA</b> .....	V
<b>RESUMEN</b> .....	VI
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	3
<b>2.1 Tecnología de extrusión</b> .....	4
2.1.1 Tipos básicos de extrusores y sus aplicaciones .....	5
2.1.1.1 Extrusores de rodillos .....	5
2.1.1.2 Extrusores de tornillo .....	5
2.1.2 Funcionamiento del extrusor .....	8
<b>2.2 El proceso de extrusión en cereales</b> .....	9
2.2.1 Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> ) .....	10
2.2.1.1 Estructura y composición del grano de cebada .....	10
2.2.1.2 Producción .....	13
2.2.2 Maíz ( <i>Zea mays l.</i> ) .....	14
2.2.2.1 Estructura y composición del grano de maíz .....	15
2.2.2.2 Producción .....	18
2.2.3 Efecto de la extrusión sobre principales nutrientes de los cereales .....	18
2.2.3.1 Almidón .....	19
2.2.3.1.1 Estructura del almidón .....	19

2.2.3.1.2 Efecto de la extrusión sobre los almidones .....	21
2.2.3.1.3 Almidón resistente (AR) .....	24
2.2.4 Proteína .....	27
2.2.4.1 Efectos de la extrusión sobre la proteína.....	27
2.2.4.2 Perfil de aminoácidos .....	28
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1 General</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2 Específicos</b> .....	<b>30</b>
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1 Materia prima</b> .....	<b>31</b>
4.1.1 Descascarillado y molienda del grano .....	31
4.1.2 Preparación de materias primas .....	33
<b>4.2 Métodos</b> .....	<b>34</b>
4.2.1 Análisis proximal.....	34
4.2.1.1 Humedad .....	34
4.2.1.2 Proteína.....	34
4.2.1.3 Cenizas.....	35
4.2.1.4 Extracto etéreo .....	36
4.2.1.5 Fibra cruda .....	36
4.2.2 Extrusión.....	37
4.2.3 Diseño experimental .....	37
4.2.4 Análisis fisicoquímicos .....	38
4.2.4.1 Índice de absorción en agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) .....	39
4.2.4.2 Índice de expansión (IE).....	39

4.2.4.3 Densidad aparente (DA) .....	40
4.2.4.4 Dureza .....	40
4.2.5 Almidón resistente .....	41
4.2.6 Perfil de aminoácidos.....	42
4.2.7 Análisis estadístico .....	43
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1 Caracterización fisicoquímica de la harina de cebada y maíz .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 Análisis fisicoquímicos de los extrudidos .....</b>	<b>46</b>
5.2.1 Índice de Adsorción de Agua (IAA) .....	49
5.2.2 Índice de Solubilidad en Agua (ISA) .....	50
5.2.3 Dureza .....	52
<b>5.3 Optimización de los productos extrudidos .....</b>	<b>56</b>
5.3.1 Composición química proximal del extrudido optimizado .....	58
5.3.2 Perfil de aminoácidos.....	59
5.3.3 Perfil de textura.....	62
5.3.4 Almidón resistente (AR) .....	63
5.3.5 Almidón disponible (AD) .....	64
<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>VII. REFERENCIAS .....</b>	<b>67</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Extrusores de rodillo o pistones .....	5
Figura 2. Extrusora de tornillo simple .....	6
Figura 3. Extrusora de tornillo doble.....	7
Figura 4. Esquema general de un extrusor de tornillo simple.....	8
Figura 5. Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas.....	9
Figura 6. Sección esquemática de los principales compartimentos del grano de cebada .....	11
Figura 7. Sección transversal del grano de maíz .....	15
Figura 8. Estructura química de la amilosa .....	20
Figura 9. Estructura química de la amilopectina.....	21
Figura 10. Diagrama de las formas físicas del almidón en proceso de gelatinización.....	24
Figura 12. Descascarilladora de laboratorio Strong-Scott .....	33
Figura 13. Molino de laboratorio Chopin CD1 .....	33
Figura 14. Extrudidos obtenidos del diseño experimental.....	48
Figura 15. Superficie de respuesta de índice de adsorción de agua (IAA).....	50
Figura 16. Superficie de respuesta de índice de solubilidad en agua (ISA) .....	52
Figura 17. Superficie de respuesta de la dureza .....	54
Figura 18. Contenido de Almidón Resistente (AR) y Almidón Disponible (AD) en la mezcla de harinas crudas y producto extrudido .....	65

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de aminoácidos esenciales de la cebada.....	12
Tabla 2. Distribución de los principales componentes del grano de cebada esmeralda.....	13
Tabla 3. Nutrientes principales de la harina completa de cebada. ....	13
Tabla 4. Contenido de aminoácidos esenciales del maíz.....	16
Tabla 5. Distribución de los principales componentes del grano de maíz. ....	17
Tabla 6. Nutrientes principales de la harina completa de maíz. ....	17
Tabla 7. Características morfológicas y contenido de amilosa de los gránulos de almidón.....	19
Tabla 8. Diseño experimental central compuesto.....	38
Tabla 9. Análisis proximal de las harinas de cebada esmeralda y maíz .....	46
Tabla 10. Análisis fisicoquímicos de las botanas extrudidas a diferentes condiciones de procesamiento .....	47
Tabla 11. Importancia del valor $p$ para los parámetros de calidad del extruido.....	55
Tabla 12. Análisis de la varianza para los diferentes modelos .....	56
Tabla 13. Composición proximal de extrudido optimizado .....	59
Tabla 14. Perfil de aminoácidos de la mezcla de harinas sin extrudir y el extrudido optimizado. ....	60
Tabla 15. Patrón de aminoácidos en adultos (gAA/100 g proteína) .....	61
Tabla 16. Análisis del perfil de textura instrumental (TPA) para una botana extrudida a base de maíz y cebada.....	63

## GLOSARIO

**PROBIÓTICO:** microorganismos vivos adicionados que permanecen activos en el intestino en cantidad suficiente como para alterar la microbiota intestinal del huésped, tanto por implantación como por colonización.

**FITOQUÍMICO:** componentes químicos naturales, biológicamente activos, que se encuentran en los alimentos derivados de plantas. Actúan como sistema de defensa en las plantas protegiéndolas de infecciones y de invasiones microbianas y confiriéndoles color, aroma y sabor.

**ANTIOXIDANTE:** molécula capaz de retardar o prevenir la oxidación de otras moléculas.

**DEXTRINIZACIÓN:** proceso mediante el cual un almidón sujeto a un calor seco, se rompe en dextrinas (denominadas priodextrinas) de color amarillo o café claro.

**BIRREFRIGENCIA:** propiedad óptica de ciertos cuerpos, que consiste en desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí.

**GELATINIZACIÓN:** proceso donde los gránulos de almidón que son insolubles en agua fría debido a que su estructura es altamente organizada, se calientan (60-70°C) y empieza un proceso lento de absorción de agua, el granulo empieza a hincharse y aumentar de volumen. Al llegar a cierta temperatura, los gránulos alcanzan un volumen máximo y pierde tanto su patrón de difracción de rayos X como la birrefringencia.

**DIGESTIBILIDAD:** forma de medir el aprovechamiento de una alimento, es decir, la facilidad con que es convertido en el aparato digestivo en sustancias útiles para la nutrición. Comprende dos procesos, la digestión que corresponde a la hidrólisis de las moléculas complejas de los alimentos, y la absorción de pequeñas moléculas (aminoácidos, ácidos grasos) en el intestino.

**RETROGRADACIÓN:** insolubilización y precipitación espontánea de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente por puentes de hidrógeno.

**SINÉRESIS:** extracción o expulsión de un líquido de un gel, por lo que el gel pasa de ser una sustancia homogénea a una segregación de componentes sólidos separados y contenidos en la fase líquida.

**IMPEDIMENTO ESTÉRICO:** propiedad de la estructura espacial de una molécula que impide o retarda la reacción con otra molécula.

**MICROFLORA COLÓNICA:** ecosistema microbiano que coloniza el tracto gastrointestinal.

**FRUCTOOLIGOSACÁRIDOS:** fibra soluble abundante en vegetales como el espárrago, la cebolla o el puerro, entre otros. El organismo no es capaz de digerir estos compuestos ni de asimilarlos, aunque sí se usan como sustrato energético por las bacterias del intestino grueso

**SÍNTESIS HEPÁTICA:** síntesis de algunas proteínas de transporte en el hígado.

**pH LUMINICAL:** en el estómago, los alimentos se mezclan con los jugos gástricos, que entre otras cosas se componen de ácido (el cual es necesario para digerir las proteínas).

**COLONOCITOS:** células que recubren el epitelio del intestino grueso o colón.

**AMORFO:** Describe un material (o parte del material) que no tiene organización.

**CRISTALINO:** Tiene las propiedades de un cristal, por extensión, caracteriza a las piezas de un material (por ejemplo, un grupo de hélices dobles, todas incluidas con la misma orientación del eje de la hélice).

# TERMINOLOGÍA

**AR:** ALMIDÓN RESISTENTE

**ANR:** ALMIDÓN NO RESISTENTE

**AGCC:** ÁCIDO GRASO DE CADENA CORTA

**µm:** MICRAS

**IAA:** ÍNDICE DE ADSORCIÓN DE AGUA

**ISA:** ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA

**IE:** ÍNDICE DE EXPANSIÓN

**DA:** DENSIDAD APARENTE

**KOH:** HIDRÓXIDO DE POTASIO

**GOPOD:** GLUCOSA OXIDADA/PEROXIDASA

**HPLC:** CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTA EFICACIA

## RESUMEN

La importancia de los cereales en la nutrición de los seres humanos es ampliamente reconocida. Debido a su ingesta relativamente elevada, no se les puede considerar sólo una fuente de energía, sino que además suministran cantidades notables de proteína y fibra (FAO, 1993). Dentro de los alimentos que utilizan a los cereales como materia prima destacan las botanas, las cuales actualmente son procesadas mediante la tecnología de extrusión (Callejo, 2002). En el afán de mejorar el contenido nutrimental de estos alimentos se busca la complementación de nutrientes con otros cereales que aporten compuestos que tengan beneficios en la salud. Por lo anterior, se pretende en este trabajo, elaborar una botana extrudida para balancear la composición de aminoácidos, combinando el maíz que es deficiente en los aminoácidos de triptófano y lisina, con cebada de la variedad Esmeralda que presenta mayor contenido en estos aminoácidos. Se estudió el efecto de la temperatura de extrusión (130-180 °C), contenido de humedad (38-45%) y la proporción de harinas de maíz y cebada Esmeralda (100:0, 80:20, 50:50, 20:80 y 0:100) de 20 extrudidos para posteriormente optimizar sobre las características fisicoquímicas y nutrimentales de las botanas extrudidas. Se optimizó el extrudido con proporción de harinas maíz y cebada de 50:50, temperatura de 130 °C y contenido de humedad de 38%. El extrudido optimizado presentó características fisicoquímicas en IAA de 6.26 g gel/g, ISA de 2.40% y dureza de 30 N. En cuanto a la composición nutrimental, presentó 6.80% de proteína, 2.98% de fibra, 1.87% en grasa y 1.33% de cenizas. El perfil de aminoácidos esenciales de la botana extrudida se comparó satisfactoriamente con la ingesta de gAA/100g de acuerdo al informe de Expertos FAO / OMS / UNU, 2007 en adultos. El extrudido presentó mayor contenido en los aminoácidos prolina (14.96%), ácido glutámico (12.96%) y leucina (12.86%). El aminoácido lisina no mostró disminución significativa ( $p < 0.05$ ) luego de la extrusión (4.04%). La cisteína es el aminoácido limitante en el extrudido (0.42%). El Análisis de perfil de textura (TPA) mostró parámetros de dureza, fracturabilidad, masticabilidad y cohesividad con valores de 30 N, 14 N, 6.88 N y 0.11 respectivamente.

Los resultados obtenidos indican que es posible mejorar la deficiencia del aminoácido lisina en el maíz adicionando harina de cebada para la elaboración de una botana expandida.

**Palabras clave:** extrusión, maíz, cebada Esmeralda, aminoácido lisina, análisis de perfil de textura (TPA).

# I. INTRODUCCIÓN

Las botanas son alimentos de alto consumo que proveen energía, proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas y minerales en mayor o menor proporción (Banner *et al.*, 1997; Navarro, 2011). Actualmente, el uso de los cereales es un medio para proveer de energía y nutrimentos esenciales en la dieta del humano; además de ser procesados para obtener botanas saludables (Bautista *et al.*, 2009). El proceso de extrusión se ha combinado en el desarrollo de botanas expandidas mediante el cual se modifican los cereales para producir un alimento con mayor valor nutricional al aumentar la digestibilidad de proteínas (por desnaturalización) y del almidón (por gelatinización) además de disminuir su aporte calórico, por la expulsión de grasa debido a la fuerte presión a la que son sometidas las finas gotas de grasa dentro del extrusor (Navarro, 2011; Zazueta *et al.*, 2011).

El maíz es el principal ingrediente de las botanas expandidas (Zazueta *et al.*, 2011), sin embargo, para incrementar su aporte nutricional se ha buscado la combinación con otros cereales, como la cebada. La cebada contiene proteínas de mayor valor biológico o que más lisina contiene a diferencia de las proteínas del maíz. En general, todos los cereales son ricos en metionina y cistina y, deficientes en el aminoácido lisina. El triptófano es el aminoácido limitante del maíz, además de la lisina, pero no es un aminoácido limitante en la cebada (USDA, 2016). Por tanto, la mezcla de maíz y cebada puede mejorar el valor biológico de la proteína de las botanas expandidas.

Un aspecto importante a resaltar, es la producción de cebada en el Estado de Hidalgo que ocupa el segundo lugar a Nivel Nacional, y más específico en la región de los valles de Apan (Roldán *et al.*, 2016). Sin embargo a pesar de que representa el 45% de la producción nacional anual, su uso en el Estado de Hidalgo se destina únicamente a la producción de malta y cerveza (Santiago *et al.*, 2016).

Por lo anterior, en este trabajo se pretende la presentación de una alternativa para el aprovechamiento de la cebada con la importancia de integrar el desarrollo de la tecnología de extrusión y mejorar el valor nutrimental de los alimentos botana.

## II. ANTECEDENTES

La industria de las botanas abarca diversos mercados y cubren muchas de las necesidades del consumidor: precio accesible, amplio surtido en sabor y tamaño, alta disponibilidad en venta, etc. (Lizárraga *et al.*, 2013). Han sido una parte integral de los hábitos alimenticios de la mayoría de las poblaciones del mundo, en México, su consumo per cápita es de 6 Kg/año (INEGI, 2016), y son definidos como alimentos que se pueden consumir a cualquier hora del día, saciando temporalmente el apetito, sin embargo estos alimentos tienden a ser elevados en calorías y grasa pero bajos en proteínas, vitaminas y otros nutrientes, por lo cual, se han estado buscando nuevas formas de obtención y formulación de botanas disminuyendo el contenido de grasas y aumentando su aporte nutricional (Navarro, 2011).

Existe una gran diversidad de métodos y tecnologías que pueden ser utilizadas para la manufactura de botanas, sin embargo, la extrusión ha venido destacando sobre todas las demás. El proceso de cocción por extrusión representa una de las tecnologías de mayor impacto en el área de alimentos (Lizárraga, 2013). Durante el proceso de extrusión el almidón, las proteínas y grasa experimentan cambios en su estructura. Algunos de los cambios principales son: formación de almidón resistente, clasificado también como fibra dietaria insoluble y se forma una vez que el almidón es calentado y posteriormente enfriado. Durante el enfriamiento hay una reasociación de algunos componentes del mismo, generando moléculas resistentes a la hidrólisis en el tracto digestivo, pero una vez que este alcanza el colón, es fermentado por las bacterias presentes en el mismo, dando como producto ácidos grasos volátiles (Siever y Pomeranz, 1989; Aguilera *et al.*, 2012). Por otro lado, las proteínas al ser sometidas al proceso de extrusión experimentan cambios conformacionales denominados desnaturalización, favoreciendo la exposición de estas a las proteasas del organismo incrementando su biodisponibilidad (Navarro, 2011).

La extrusión no parece afectar negativamente a las grasas y los aceites. Estudios han demostrado que existe un poco o ninguna indicación de la rancidez por oxidación térmica de la grasa. La grasa es un lubricante, que le permite al producto pasar a través del tornillo (s) y el cilindro de la extrusora con menos resistencia, sin embargo, debido a la elevada presión del proceso puede ser expulsada de la materia prima en finas gotas dentro de la extrusora (Valls, 1993).

## 2.1 Tecnología de extrusión

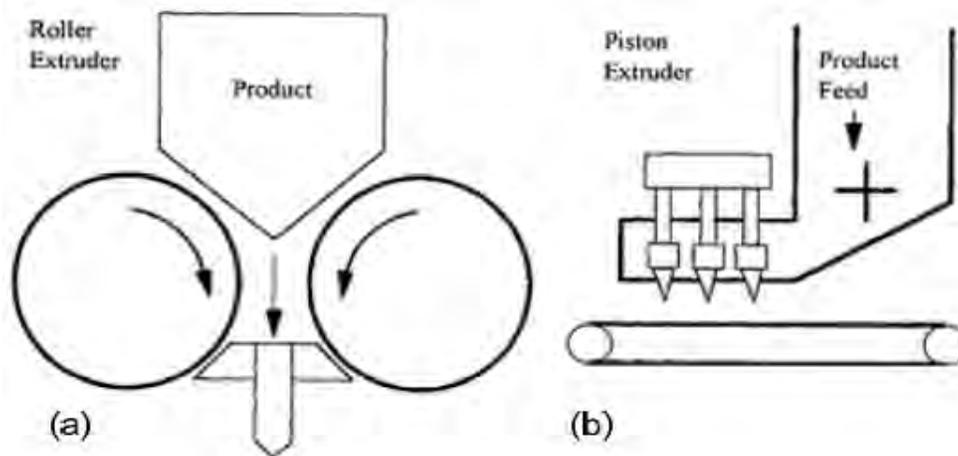
La cocción por extrusión es un proceso térmico-mecánico en el cual se someten materiales como es el caso del almidón, a diferentes condiciones de temperatura, presión y esfuerzo de corte. Se trata de una cocción con niveles de humedad que van en un intervalo de 10-40% y a pesar de estos bajos valores de humedad el material se transforma en un fluido dentro del extrusor (Osella, 2000). Bajo estas condiciones las características físicas de las materias primas, tales como el tamaño de partícula, la dureza y el grado de plastificación alcanzado durante el proceso llegan a ser determinantes para la transformación final del material (González *et al.*, 2002). Es un proceso muy versátil debido a que en el extrusor pueden llevarse a cabo en forma continua los procesos de mezclado y homogenización, cocimiento, amasado, formado, expansión y secado (Dziekak, 1989; Zazueta *et al.*, 2011).

Existe una amplia variedad de extrusores los cuales se caracterizan no solo por la complejidad de los diseños, sino también por el grado de sofisticación en los sistemas de control de la operación. De los cuales pueden destacarse, los extrusores de rodillos y los extrusores de tornillo (Harper, 1989; Gonzales *et al.*, 2002).

## 2.1.1 Tipos básicos de extrusores y sus aplicaciones

### 2.1.1.1 Extrusores de rodillos

La masa previamente formada es forzada a pasar entre dos rodillos que giran en sentidos opuestos y que pueden ser lisos o tener troqueles en ellos (Figura 1). En el primer caso sólo formarán una lámina del grosor que se desee (según la separación entre los rodillos), y en el segundo permitirán también cortar las formas deseadas en dicha lámina (Gonzales *et al.*, 2002). Un ejemplo del uso de este tipo de extrusores en la industria de cereales es la producción de aperitivos como los del tipo nachos o Doritos o las tiras de maíz (Fritos). La única misión del extrusor es la de dar forma a los productos. La preparación del alimento se debe terminar en otro equipo diferente, horneándolo o friéndolo (Gray y Chinnaswamy, 1995).



**Figura 1.** Extrusores de rodillo (a) o pistones (b). Gray y Chinnaswamy, 1995.

### 2.1.1.2 Extrusores de tornillo

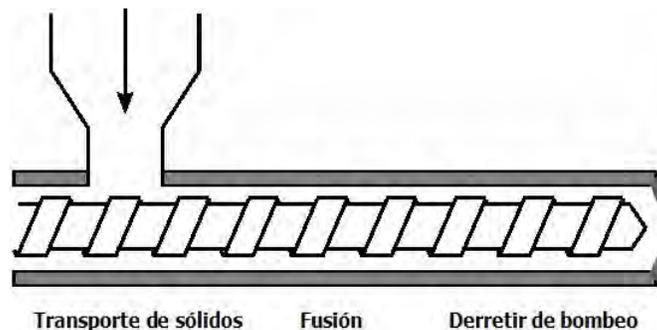
Consisten en uno o varios tornillos que giran en el interior de una cámara cilíndrica. El movimiento de los tornillos transporta el material y lo fuerza a través de un troquel, que puede adoptar formas variadas (Serna, 2009). Es posible

controlar diversos parámetros del proceso, tal como la velocidad y configuración de los tornillos, la temperatura y longitud de la cámara o la forma del troquel. Este tipo de extrusor no sólo mezcla y moldea, sino que es capaz de “cocinar” los distintos ingredientes dando lugar a productos semi-acabados o completamente acabados. Los extrusores de tornillo han alcanzado un gran desarrollo en las últimas décadas, por el control que permiten del proceso de extrusión y su enorme versatilidad, que hace posible usarlos en la fabricación de productos variados e innovadores (Serna, 2009).

Los extrusores de tornillo pueden ser de tornillo simple o doble, e incluso múltiples, pero este último no es lo más frecuente.

#### a) Extrusores de tornillo simple

Son los más extendidos en la práctica, ya que es fácil de operar y requiere menos entrenamiento de los operarios (Figura 2). Además tienen un coste y mantenimiento más bajo que los extrusores de tornillo doble. Se utilizan para la fabricación de pasta, cereales de desayuno, almidones modificados, aperitivos, pienso para mascotas o proteína vegetal texturizada, entre otros (Serna, 2009).

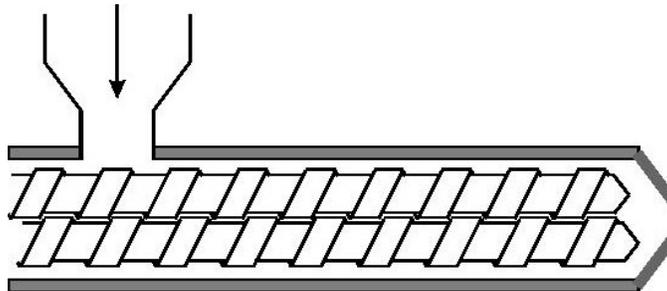


**Figura 2.** Extrusora de tornillo simple

<http://pervysa.blogspot.mx/p/aprendiendo.html>

## b) Extrusores de tornillo doble

Constan de dos tornillos de igual longitud situados en el interior del mismo cilindro (Figura 3). En general no se basan en el rozamiento para el transporte del material, sino que actúan como bombas de desplazamiento positivo. Surgieron en los años 70 del pasado siglo, inicialmente en la industria de plásticos, aunque después han sido ampliamente adoptados por la industria de alimentos (Gray y Chinnaswamy, 1995). Son más complejos que los de tornillo simple, pero proporcionan mucha más versatilidad y un mejor control de las variables del proceso de extrusión, principalmente del tiempo de residencia y la cizalla. Por ello permiten obtener productos muy variados e innovadores en cuanto a su apariencia (Serna, 2009). Se clasifican en función de la posición de un tornillo respecto al otro, que varía desde completamente engranados hasta totalmente separado, y de la dirección de giro de los mismos. Si ambos tornillos giran en la misma dirección se denominan corrotativos, y en el caso contrario contrarrotativas. En la práctica existen todas las combinaciones físicamente posibles de estas dos opciones, lo que conduce a una gran variedad de equipos con capacidades y aplicaciones muy diferentes.



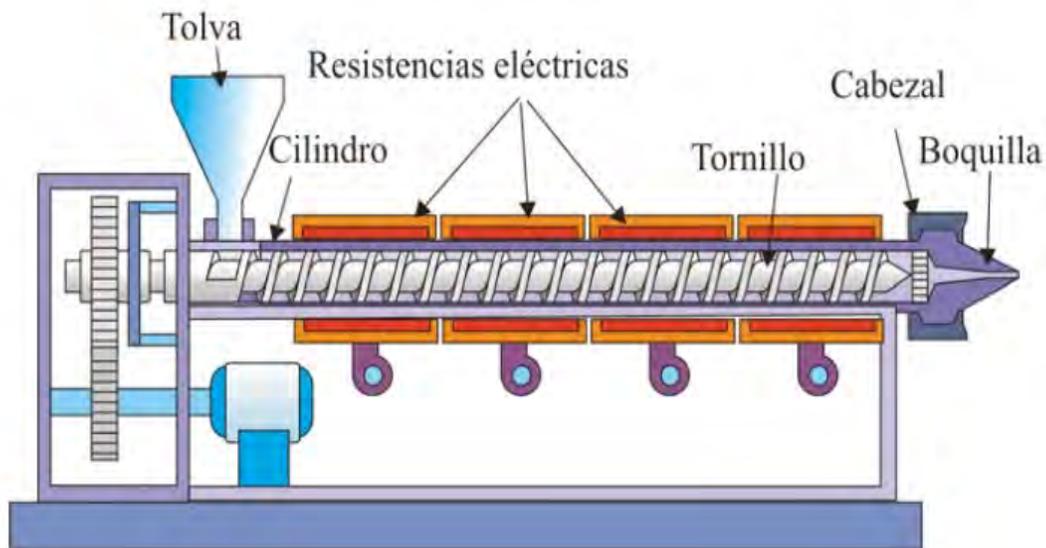
**Figura 3.** Extrusora de tornillo doble  
<http://pervysa.blogspot.mx/p/aprendiendo.html>

Cuando ambos tornillos están engranados y giran en distinto sentido, el contenido de cada tornillo no se mezcla con el otro, lo cual es útil para productos de baja viscosidad (jaleas, goma de mascar), pero no son adecuados para productos

expandidos. Por su parte si giran en el mismo sentido permiten que la masa circule de un tornillo al otro, lo que proporciona muy buen grado de mezcla, útil para productos expandidos (Gray y Chinnaswamy, 1995).

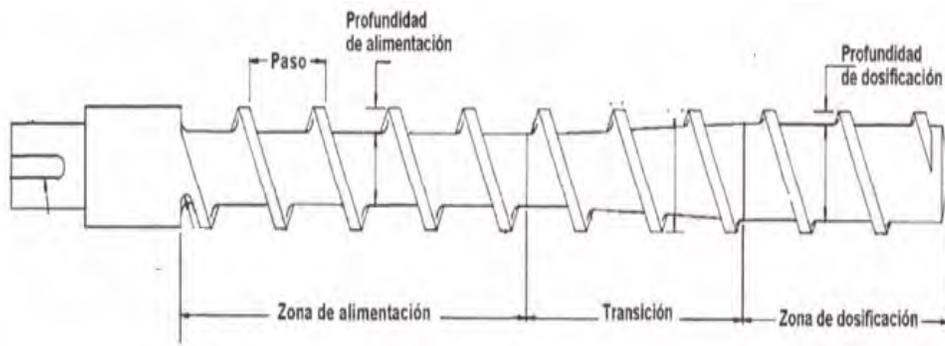
### 2.1.2 Funcionamiento del extrusor

Como puede observarse en la Figura 4, el sistema de alimentación más habitual es una tolva, en la que el material a procesar se alimenta en forma de polvo. El dispositivo de fusión-plastificación, bombeo y mezclado está constituido por un tornillo de Arquímedes que gira en el interior de un cilindro calentado, generalmente mediante resistencias eléctricas. En la parte del cilindro más alejada de la tolva de alimentación se acopla un cabezal cuya boquilla de salida tiene el diseño adecuado para que tenga lugar el conformado del producto. La parte esencial de la máquina es el sistema cilindro-tornillo que, como consecuencia del giro, compacta al alimento sólido, da lugar a la fusión del material y lo transporta hacia la boquilla de conformado, produciendo al mismo tiempo la presurización y el mezclado del material (González, 2002; Serna, 2009).



**Figura 4.** Esquema general de un extrusor de tornillo simple. Beltrán, 2011; González, 2002.

Todas las extrusoras se consideran divididas en tres zonas (Figura 5). La zona de alimentación es la más cercana a la tolva, en la cual la profundidad del canal del tornillo es máxima. Tiene como objetivo principal compactar el alimento en una forma sólida densa y transportarlo hacia la siguiente zona a una velocidad adecuada. La zona de transición o compresión es la zona intermedia en la cual la profundidad del canal disminuye de modo más o menos gradual. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que pudiera quedar atrapado escapa del material vía la tolva de alimentación. En la zona de transición, además, tiene lugar la fusión final del material. La zona de dosificado se sitúa al final, en la parte más cercana a la boquilla y tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante. En esta zona el material es homogenizado y presurizado para forzarlo a atravesar a presión la boquilla de conformado (Guy, 2001; González, 2002).



**Figura 5.** Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas (Beltrán, 2011; González, 2002).

## 2.2 El proceso de extrusión en cereales

El proceso de extrusión ha sido utilizado para la obtención de diferentes productos alimentarios a base de diferentes cereales, en algunos casos se han utilizado mezclas con leguminosas. Pérez-Navarrete *et al.*, (2006) reportaron el uso de frijol y maíz como mezcla para la obtención de extrudidos, para proveer una

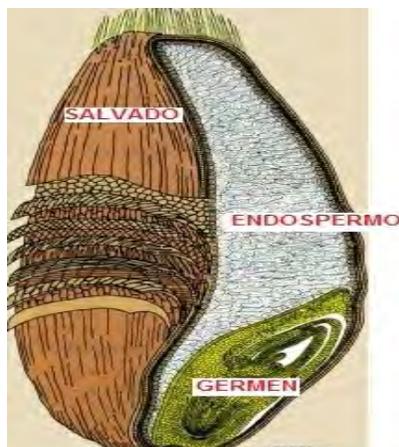
composición balanceada de aminoácidos. Por otro lado, Delgado *et al.*, (2011) reportan que es posible mejorar las características nutrimentales de los alimentos botana adicionando harina de calabaza y maíz amarillo por su importante aporte de fibra dietaria de estas materias primas. Por su parte, Márquez y Román (2011), evaluaron la calidad nutrimental de la mezcla en diferentes proporciones de diferentes variedades de cebada que son cultivadas en el Estado de Hidalgo.

Por lo anterior, la demanda de cereales precocidos se ha incrementado en los últimos años, los cuales se consumen en forma de “snacks”, siendo el maíz el cereal más utilizado (Dos Santos Fernández, *et al.*, 2002). Sin embargo, la cebada por su composición proteica y en fibra, sin mencionar su alto aporte en energía, podría tener un uso alternativo en la elaboración de alimentos botana combinando con leguminosas y/o cereales para mejorar la calidad nutrimental del alimento. Ya que actualmente el principal uso que se le ha dado a la cebada es en la industria cervecera.

## **2.2.1 Cebada (*Hordeum vulgare*)**

### **2.2.1.1 Estructura y composición del grano de cebada**

La cebada pertenece a la familia de las gramíneas, en forma de cariósipide con las glumillas adheridas (Figura 6), posee dos compartimentos especiales: el endospermo y el embrión, ambas zonas se encuentran rodeadas por dos capas externas (testa y pericarpio). La función principal del pericarpio es la de proteger el grano contra agentes bióticos externos, impedir la pérdida de humedad, conducir y distribuir el agua y otros nutrientes durante la germinación (Márquez y Román, 2007).



**Figura 6.** Sección esquemática de los principales compartimentos del grano de cebada. [http://wbc.agr.mt.gov/wbc/Consumer/Diagram\\_Kernel/](http://wbc.agr.mt.gov/wbc/Consumer/Diagram_Kernel/)

El grano de cebada está compuesto por un 3,5% de germen, un 18% de pericarpio y un 78,5% de endospermo (incluyendo la aleurona). El germen es rico en azúcares (sacarosa, rafinosa y fructosanas). La capa de aleurona es rica en fibra, proteína, triglicéridos y azúcares. El endospermo es fundamentalmente de tipo harinoso (Callejo, 2002).

El contenido en almidón y la proporción de amilosa de la cebada, es inferior a los del maíz. El grano contiene un 2-3% de azúcares solubles (sacarosa y rafinosa). La presencia de las glumas en el grano implica un contenido elevado en fibra, la mayor parte de la fibra está constituida por  $\beta$ -glucanos y pentosanas, en proporciones muy variables (1.6-8.3% y 4.4-8.7%, respectivamente) dependiendo de la variedad, zona de procedencia y climatología. El contenido medio de  $\beta$ -glucanos es superior al del maíz. Al estar localizados en la pared celular del endospermo y de la capa de aleurona, su proporción aumenta en granos desnudos. La concentración de estos componentes fibrosos aumenta en condiciones de falta de humedad durante la etapa de maduración del grano (golpe de calor), lo que da lugar a variaciones geográficas e interanuales importantes. Estos compuestos son parcialmente solubles en agua, e incrementan la viscosidad

del contenido digestivo, lo que supone un descenso de la ingestión y dificulta la absorción de los demás nutrientes (FEDNA, 2016).

La cebada tiene una baja proporción de grasa (2%) y de ácido linoleico (0.8%), también tiene un bajo contenido en pigmentos, vitaminas liposolubles y vitamina B12. En cambio, es una fuente excelente de algunas vitaminas del grupo B (tiamina, riboflavina, piridoxina, ácido pantoténico) y de niacina (FEDNA, 2016).

La proporción de proteínas solubles (albúminas y globulinas) en la proteína total es relativamente alta (25%). El grano contiene además un 52% de prolamina (hordeína) y un 23% de glutelina. Estas son proteínas de reserva del endospermo, tienen un contenido mayor de ácido glutámico y prolina que las proteínas solubles del germen y salvado (albúminas y globulinas). La concentración de estas últimas (son más ricas en lisina que las proteínas del endospermo) es ligeramente superior en la cebada (15%) que en el maíz (FEDNA, 2016).

La calidad nutritiva de la cebada viene determinada por la composición de aminoácidos de sus proteínas (Tabla 1), y es afectada por la deficiencia de algunos aminoácidos esenciales sobre todo lisina (FAO, 2003).

**Tabla 1.** Contenido de aminoácidos esenciales de la cebada

AAs	Composición en base seca	
	(% PB)	(%)
<b>Lisina</b>	3.60	0.41
<b>Metionina</b>	1.64	0.19
<b>Metionina + Cisteína</b>	3.83	0.43
<b>Treonina</b>	3.31	0.37
<b>Triptófano</b>	1.20	0.14
<b>Isoleucina</b>	3.50	0.40
<b>Valina</b>	4.90	0.55
<b>Arginina</b>	4.91	0.55

PB: peso bruto. Fuente: FEDNA, 2016

En general, la cebada presenta la composición química mostrada en la Tabla 2 del grano y en la Tabla 3 de la harina (Rodríguez *et al.*, 2005).

**Tabla 2.** Distribución de los principales componentes del grano de cebada esmeralda.

<b>Componte</b>	<b>Composición en base seca (%)</b>
Carbohidratos	65.0 – 72.0
Proteína	10.0 – 11.0
Grasa	1.5 – 2.5
Fibra	2.5 – 4.5
Ceniza	2.0 – 3.0

Fuente: Callejo, 2002.

**Tabla 3.** Nutrientes principales de la harina completa de cebada.

<b>Componte</b>	<b>Composición en base seca (%)</b>
Carbohidratos	70.0
Proteína	8.4
Grasa	2.2
Fibra	6.1
Ceniza	2.2

Fuente: López *et al.*, 2007

### 2.2.1.2 Producción

En cuestión de producción, la cebada ocupa el cuarto lugar en importancia en el mundo, después del maíz, trigo y arroz, tanto por su producción como por el volumen que se destina al consumo humano (Callejo, 2002). Se ha destacado por ser un cultivo de gran importancia económica y social en México; tan sólo en el

año 2016 la producción nacional de este cereal aumentó en relación con lo obtenido en el año previo, reflejo de una mayor productividad en el campo. La producción de este cultivo alcanzó las 965 mil 332 toneladas, lo que representa un volumen adicional de 241 mil 953 toneladas. La cebada se produce en 16 entidades del país, las cinco principales son Guanajuato, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Estado de México, que en conjunto aportan 859 mil toneladas, es decir el 89 por ciento del volumen nacional (SAGARPA, 2016).

Guanajuato produce 372 mil 167 toneladas; Hidalgo, 268 mil 595 toneladas; Tlaxcala, 83 mil 469; Puebla, 68 mil 508 toneladas, y el Estado de México, 66 mil 393 toneladas (SAGARPA, 2016).

Los tipos de cebada que se cultivan en los estados de Hidalgo pertenecen a la especie *Hordeum vulgare*; existe una amplia diversidad de variedades de cebada, entre las cuales se pueden destacar Esmeralda, Pastor Ortiz, M16, Esperanza, Gaviota, Forrajera, entre otras de menor producción (León *et al.*, 2007; Bautista *et al.*, 2009).

Su relevancia económica y social es fuente de empleo y alimento para un número importante de personas no solo en el mundo, sino también en el Estado de Hidalgo.

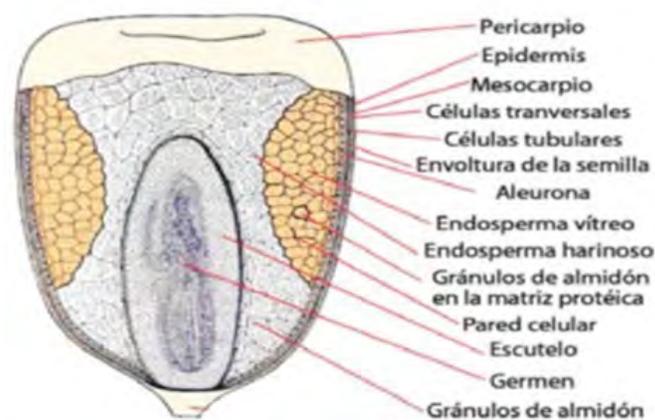
### **2.2.2 Maíz (*Zea mays L.*)**

El maíz es, junto con la cebada, uno de los cereales ciertamente más importantes del mundo; suministra elementos nutritivos a los seres humanos y a los animales y es una materia prima básica de la industria de transformación de la que se obtienen diversos componentes como el almidón, aceite y proteínas (Guy, 2001; León *et al.*, 2007).

### 2.2.2.1 Estructura y composición del grano de maíz

La calidad del maíz está determinada principalmente por la estructura y composición del grano, las que dependen del híbrido o variedad utilizada, así como de las prácticas de manejo, el clima, el suelo y los métodos de cosecha, secado, almacenaje y transporte (Percibaldi, 2003).

La estructura anatómica de los cereales es básicamente similar, diferenciándose un cereal de otro solamente en ciertos detalles. Los granos de trigo, centeno y maíz están compuestos por una cubierta llamada pericarpio, un germen localizado en un extremo y un endospermo localizado en el centro de la semilla o grano (Figura 7). Los granos de avena, cebada y arroz contienen además, la envoltura del fruto o semilla denominada gluma, que constituye la cáscara (Cheryan y Shukla, 2001; León *et al.*, 2007).



**Figura 7.** Sección transversal del grano de maíz. Cheryan y Shukla, 2001.

El pericarpio que es la cubierta externa de la semilla, fruto o grano; la aleurona que es una capa de células que corresponde al endospermo; el endospermo que es el sitio en donde se encuentran las reservas de la semilla cuyos componentes principales son los gránulos de almidón y las proteínas; el germen o embrión donde se encuentra especialmente la materia grasa y la maquinaria biológica para

la germinación y el pedicelo que es el tejido remanente por donde se conecta el grano con el marlo (Percibaldi, 2003).

Los granos de maíz contienen como media un 83% en peso de endospermo, un 11% de germen y un 6% de pericarpio. Alrededor del 50% del endospermo es de tipo córneo (más denso y con mayor contenido en proteína que el endospermo harinoso).

El maíz es el grano de cereal de mayor valor energético, debido a su alto contenido en almidón y grasa, y su bajo nivel de fibra. La proporción media de amilosa y amilopectina es 25:75. La fracción fibrosa (8% FND) está concentrada en el salvado (82-92%) e incluye principalmente celulosa y pentosanas. Tiene un contenido apreciable de grasa, siendo una buena fuente de ácido linoleico (1.8%).

El maíz es deficitario en proteína, que además no está bien equilibrada, especialmente en lisina y triptófano. Según algunos investigadores (Lehman *et al.*, 1955), es el triptófano, no la lisina, el principal aminoácido limitante. En la Tabla 4 se muestra la composición en aminoácidos del maíz. La fracción nitrogenada del grano tiene una baja proporción de proteínas metabólicas solubles (albúminas y globulinas, 6%) y alta de proteínas de reserva (40% de glutelina y 54% de prolamina (zeína)).

**Tabla 4.** Contenido de aminoácidos esenciales del maíz.

AAs	Composición en base seca	
	(% PB)	(%)
<b>Lisina</b>	2.95	0.22
<b>Metionina</b>	2.07	0.15
<b>Metionina + Cisteína</b>	4.29	0.31
<b>Treonina</b>	3.56	0.27
<b>Triptófano</b>	0.78	0.06
<b>Isoleucina</b>	3.40	0.26
<b>Valina</b>	4.75	0.36
<b>Arginina</b>	4.50	0.33

PB: peso bruto. Fuente: FEDNA, 2016.

Al igual que otros cereales, el maíz es muy deficitario en calcio, sodio, microminerales y vitaminas hidrosolubles. El contenido en fósforo es aceptable (0.25%) pero en gran parte se encuentra en forma de fitatos poco disponibles. Además, el grano no contiene fitasas activas. Es una buena fuente de vitamina A y de xantofilas; contiene mono y dihidroxipigmentos (luteína y zeaxantina).

En las Tablas 5 y 6, se registra la composición química promedio tanto en el grano, como en la harina del maíz, siendo el almidón el principal componente, seguido de la proteína y la fibra dietética que son también componentes importantes, aunque son pobres en minerales (Guy, 2001).

**Tabla 5.** Distribución de los principales componentes del grano de maíz.

Componentes	Grano entero (%)	Composición en base seca (%)			
		Endospermo	Germen	Pericarpio	Pedículo
Almidón	62.0	87.0	8.3	7.3	5.3
Proteína	7.8	8.0	18.4	3.7	9.1
Lípidos	3.8	0.8	33.2	1.0	3.8
Cenizas	1.2	0.3	10.5	0.8	1.6

Fuente: Cheryan y Shukla, 2001.

**Tabla 6.** Nutrientes principales de la harina completa de maíz.

Componente	Composición en base seca (%)
Proteína	8.0 – 10.0
Lípidos	6.0 – 7.0
Cenizas	1.5 – 2.5
Hidratos de carbono	72.0 – 75.0

Fuente: Miranda *et al.*, 2015.

### **2.2.2.2 Producción**

En México, la producción de maíz, que incluye la variedad blanco y amarillo, se incrementó en 12.7 por ciento. En el ciclo Primavera–Verano 2015 se produjeron 17.3 millones de toneladas de maíz en ambas variedades y en el ciclo Otoño - Invierno 2015/16, la producción fue de 8.4 millones de toneladas (SAGARPA, 2016).

Para el ciclo Primavera–Verano, los principales estados productores de maíz son Jalisco, Estado de México y Michoacán, que abarcan el 40 por ciento de la producción y le siguen en importancia, Guanajuato, Chihuahua, Puebla, Chiapas, Guerrero y Veracruz (SAGARPA, 2016).

Para el ciclo Otoño–Invierno, los estados que aportaron el mayor volumen fueron Sinaloa y Tamaulipas, con cerca del 84 por ciento del total para este periodo, destacan también Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Guerrero (SAGARPA, 2016).

Del volumen producido en el año comercial que recién terminó (25.7 millones de toneladas), 22.3 millones de toneladas corresponden a maíz blanco (destinado principalmente para consumo humano) y el resto fue de maíz amarillo (utilizado para los sectores pecuario e industrial). El maíz es en la actualidad el cereal con mayor producción mundial, 724 millones de toneladas en 2012 (FAOSTAT 2012), superando tanto al trigo como al arroz (SAGARPA, 2016).

Por otro lado, el crecimiento en el consumo también incrementó a 0.4 por ciento en el 2016, lo que traduce a una tasa anual de 38.7 millones de toneladas (FIRA, 2016).

### **2.2.3 Efecto de la extrusión sobre principales nutrientes de los cereales**

El proceso de extrusión de los cereales es una forma de cocción rápida, continua, homogénea y de volúmenes industriales importantes. Como en toda cocción, hay

una serie de cambios sustantivos a nivel de forma y contenido del producto cocinado. Si al proceso de cocción se agrega, alta presión, en un periodo corto de tiempo como ocurre en la extrusión, seguramente una serie de cambios ocurren a nivel estructural del alimento (Gómez, 2007). Lo ideal de todo proceso es obtener buenos resultados, de una manera eficiente, y homogénea, que lleven a obtener un producto de altas cualidades y calidades para el consumo.

### 2.2.3.1 Almidón

El almidón es un hidrato de carbono que se encuentra principalmente en los cereales y corresponde del 60 al 80% del peso del grano. El 1 al 3% está representado por otros hidratos de carbono, entre los cuales son azúcares sencillos en forma de glucosa, sacarosa y fructosa (Ortiz y Ramírez, 2006). El almidón está constituido por gránulos pequeños de diferentes formas en función de su origen (Tabla 7). Se sabe que la variación morfológica y la composición química en los gránulos de almidón, son características importantes que llegan a afectar tanto las propiedades funcionales así como también su susceptibilidad al ataque enzimático.

**Tabla 7.** Características morfológicas y contenido de amilosa de los gránulos de almidón.

Fuente de almidón	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Forma	Amilosa (%)
<b>Maíz</b>	20	Poligonal	25
<b>Cebada</b>	23	Redonda, elíptica	22

Fuente: Millán-Testa, 2004; Agustiano *et al.*, 2004.

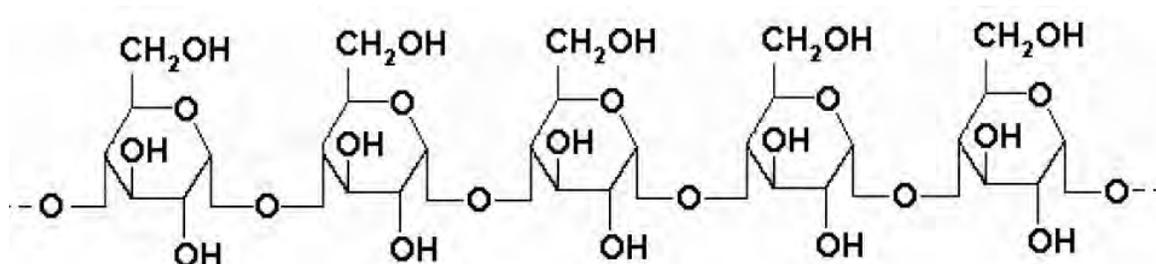
#### 2.2.3.1.1 Estructura del almidón

Las propiedades funcionales del almidón son determinadas por sus dos componentes que son dos polisacáridos de alto peso molecular: amilosa y

amilopectina. Los gránulos de almidón son parcialmente cristalinos y parcialmente amorfos, el carácter cristalino proviene de la organización de las moléculas de amilopectina dentro del gránulo, mientras que la región amorfa está formada por la amilosa que está distribuida al azar entre los clusters de la amilopectina (Abd Karim *et al.*, 2000).

#### a) Amilosa

La amilosa es una molécula predominantemente lineal formada de unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1-4) (Figura 8). Sin embargo se ha reportado en ella la presencia de algunos enlaces ramificados  $\alpha$  (1-6) en algunos almidones (Hoover, 2001; Parker y Ring, 2001). La hélice tiene en su interior hidrógenos, los cuales le dan una característica hidrofóbica (Stick, 2001). También se ha reportado que el peso molecular de la amilosa presente en diferentes fuentes de almidón es aproximadamente de  $1 \times 10^5$ -  $1 \times 10^6$  Da, con un promedio de 500 a 6000 unidades de D-glucosa, repartidas en un número de cadenas que va de 1 a 20 (Guy, 2001; Sandhu, *et al.* 2004; Bello, *et al.* 2002).

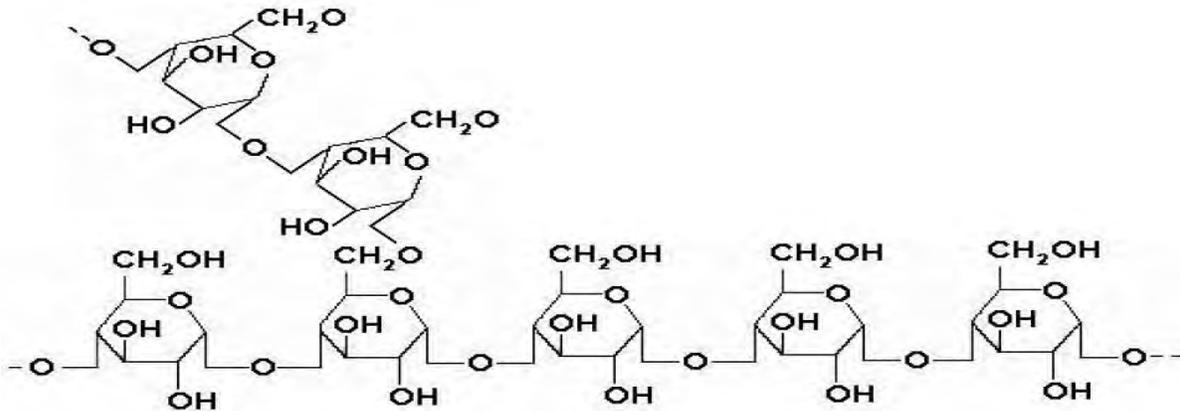


**Figura 8.** Estructura química de la amilosa (Meneses *et al.*, 2008).

#### b) Amilopectina

La amilopectina es generalmente el mayor componente presente en el almidón nativo. La amilopectina es un polisacárido altamente ramificado y cuya molécula

está constituida por unidades de D-glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1-6) (Figura 9). El peso molecular de la amilopectina varía entre  $1 \times 10^6$  y  $1 \times 10^8$  Da, estas variaciones dependen del origen botánico del almidón, de las condiciones de separación de la amilosa y la amilopectina y del método usado para determinar la masa molar (Guy, 2001; Sandhu, *et al.* 2004; Bello, *et al.* 2002).



**Figura 9.** Estructura química de la amilopectina (Meneses *et al.*, 2008).

### 2.2.3.1.2 Efecto de la extrusión sobre los almidones

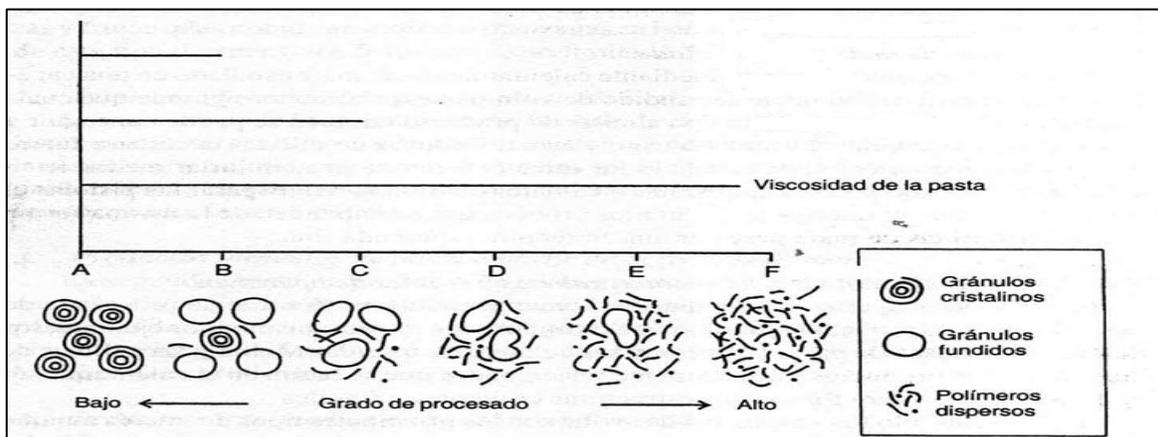
El almidón puede sufrir diversas transformaciones, cuya intensidad depende de varios factores a saber: concentración, nivel de esfuerzos mecánicos durante el proceso de cocción, tiempo de tratamiento, temperatura alcanzada, velocidad de calentamiento, etc. Tales transformaciones puede alcanzar un estado del almidón caracterizado no solo por la pérdida su estructura cristalina sino también por la dextrinización de la estructura granular, es decir hidrólisis de los enlaces glicosídicos (Sandhu, *et al.*, 2004).

#### c) Gelatinización

La gelatinización es un proceso hidrotérmico (calentamiento en exceso de agua), mediante el cual el gránulo pierde la estructura cristalina y sufre un proceso de

hinchamiento irreversible, este fenómeno ocurre a una cierta temperatura llamada temperatura de gelatinización o TG (Blanshard, 1987). Este fenómeno empieza en las regiones amorfas del gránulo donde los enlaces de hidrógeno son menos numerosos y el polímero es más susceptible a ser disuelto. A medida que la estructura comienza a disolverse, el gránulo absorbe agua y se hincha. Cuando la cantidad de agua es limitada, no ocurre una gelatinización completa en el intervalo usual de temperatura; sin embargo, conforme la temperatura se incrementa, los gránulos de almidón se vuelven progresivamente más móviles y eventualmente las regiones cristalinas se funden (Figura 10). La gelatinización del almidón es un proceso obligado para que este pueda ser consumido, pues la mayoría de los alimentos mejoran con la cocción, la cual realza la apariencia, sabor, textura y digestibilidad de los alimentos (Manrique y Bello, 2006).

Las estructuras moleculares de los constituyentes del almidón contribuyen al incremento de la viscosidad en el medio. Este fenómeno está relacionado con la cantidad de agua disponible para hidratar el gránulo, a medida que disminuye, la temperatura de transición cristalina–amorfa aumenta (Biliaderis, 1991; Akalu *et al.*, 1998; Gómez *et al.* 2013).

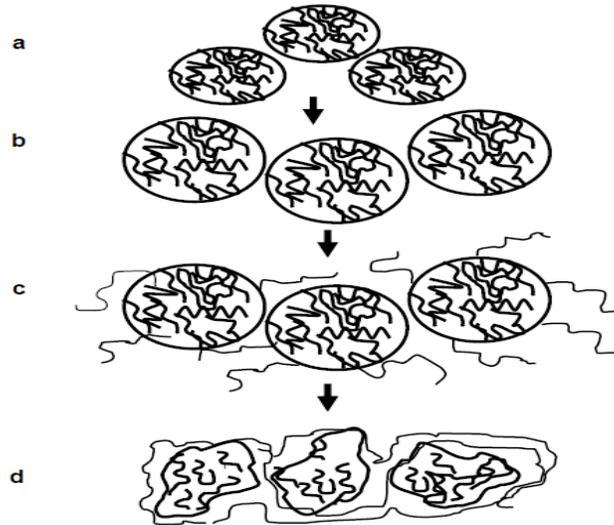


**Figura 10.** Diagrama de las formas físicas del almidón en proceso de gelatinización. <http://www.webs.ulpgc.es/nutranim/tema5.htm>

#### d) Retrogradación

Una vez completado el proceso de gelatinización, al enfriar la dispersión, se produce otro proceso llamado retrogradación, involucra la asociación por puente de hidrógeno de cadenas de las amilosa que han sido dispersadas fuera del gránulo, formándose una nueva estructura (tipo “gel”) que incluye a los restos de gránulos parcialmente dispersados. Este proceso, cinéticamente lento, culmina con la separación de dos fases: una fase acuosa en la capa superior y una fase “gel”, en la parte inferior (Figura 11). Esta separación es llamada “sinéresis” (Shewry, 2002; González, 2002; Sing, *et al.*, 2003). Por otro lado, la amilopectina se retrograda de una forma más lenta esto es debido al impedimento estérico de sus ramificaciones. La malla formada por estas macromoléculas atrapa o retiene a los fragmentos de gránulos, aumentando considerablemente la viscosidad de la matriz, la cual a temperatura ambiente adquiere apariencia de gel (Guy, 2001; González, 2002).

La retrogradación del almidón o el endurecimiento de los productos, es más lento cuando el contenido de humedad es mayor. La retrogradación es un proceso complejo y depende de muchos factores, como el tipo y concentración de almidón, regímenes de cocimiento y enfriamiento, pH y la presencia de solutos como lípidos, sales y azúcares. Durante el proceso de retrogradación, también se manifiesta por la formación de precipitados o geles que afectan la textura, aceptabilidad y digestibilidad de los alimentos que contienen almidón. (Biliaderis, 1991; Manrique y Bello, 2006).



**Figura 11.** Mecanismo de la gelatinización del almidón. a) Gránulos del almidón nativo con sus dos componentes; la amilosa y la amilopectina, b) El agua adicionada penetra en la zona amorfa lo cual con lleva al hinchamiento de los gránulos de almidón, c) el suministro de calor y humedad causan más hinchamiento: la amilosa se difunde fuera del gránulo, d) la amilopectina queda dentro del gránulo; la amilosa lixiviada forma una matriz lo cual con lleva la formación de un gel (Lai y Kokoni, 1991; Manrique y Bello, 2006).

Muchos estudios reconocen que el almidón, como componente predominante en los cereales, juega un rol principal en la elaboración de botanas por el método de extrusión, ya que es el responsable de conferir alto grado de expansión que va ligado directamente con la textura del producto final (Guy, 2001).

### 2.2.3.1.3 Almidón resistente (AR)

Se pensaba que la digestión del almidón se completaba en el intestino delgado humano, ya que se encontraba poco almidón en las heces. Sin embargo, gran cantidad de estudios han demostrado que una proporción importante del almidón llega al intestino grueso (Topping y Clifton, 2001). Este almidón se denomina almidón resistente (AR) y se define como la suma del almidón y los productos de degradación del mismo no absorbidos en el intestino delgado de individuos sanos

(Asp, 1996), después de 120 min de ser consumidos, y que es fermentable en el colon (Englyst *et al.*, 1992).

El AR ha sido reconocido como fibra funcional para realizar un papel importante en la fisiología digestiva. Similares a los oligosacáridos, especialmente los fructo-oligosacáridos, que escapan a la digestión y proporciona hidratos de carbono fermentables para las bacterias del colon. El AR también ha demostrado proporcionar tales beneficios como la producción de metabolitos deseables incluyendo los ácidos grasos de cadena corta en el colon. Además, el AR proporciona un mejor aspecto, textura y sensación en la boca que las fibras convencionales (Martínez *et al.*, 1999; Gómez *et al.*, 2013).

La ruta que el AR sigue en el sistema digestivo inicia en la ingesta de los alimentos que lo contienen y llega al intestino delgado, donde las enzimas no pueden desdoblarlo para su absorción, por lo que pasa al intestino grueso donde es fermentado por la microflora colónica (Bravo *et al.*, 1998), de ahí la producción de ácidos grasos de cadena corta, tales como el ácido butírico del cual se producen cantidades mayores, comparada con la producida por la fibra dietética soluble, la cual participa en la prevención de cáncer de colon; también se produce ácido acético que regula el metabolismo de glucosa, y el ácido propiónico que disminuye la síntesis hepática del colesterol y, por último, participa en el metabolismo de glucosa (García *et al.*, 2002).

Los AGCC son los productos metabólicos de la fermentación bacteriana anaerobia de polisacáridos, oligosacáridos, proteína, péptido y precursores de glicoproteína en el intestino grueso, incluyendo los derivados de la fibra dietética y AR (Andoh *et al.*, 2003). Estos AGCC aumentan el flujo de sangre del colon, bajan el pH luminal y ayudan a prevenir el desarrollo de células anormales del colon (Topping y Clifton, 2001). Además, con un bajo pH (ácido) en combinación con altas concentraciones de AGCC puede prevenir el crecimiento excesivo de bacterias patógenas (Topping y Clifton, 2001).

Englyst *et al.*, (1992), propusieron la clasificación de AR, que se encuentra basada en la naturaleza del almidón y las condiciones ambientales del alimento. Esta clasificación se divide en cuatro grupos.

**AR1:** Es el almidón físicamente inaccesible, y atrapado en una matriz celular, lo que impide su completo hinchamiento y dispersión. Este tipo de almidón puede ser encontrado en granos parcialmente molidos, semillas y legumbres.

**AR2:** Son gránulos de almidón nativo, no sometido a ningún proceso, debido a su gran densidad y a su cristalinidad parcial se reduce la susceptibilidad enzimática.

**AR3:** Es el almidón retrogradado, formado en alimentos cocinados y almacenados, donde el fenómeno de la retrogradación se ha iniciado.

**AR4:** La resistencia enzimática de éste tipo de almidón es debido a una modificación química, física o térmica. La formación de enlaces glucosídicos diferentes en los enlaces  $\alpha(1-4)$  o  $\alpha(1-6)$  por tratamiento térmico, reduce la disponibilidad para las enzimas amilolíticas. También los enlaces cruzados o la presencia de algunos sustituyentes (por ejemplo, hidroxipropilo) pueden reducir la digestibilidad del almidón (Tovar *et al.*, 1992; Bello *et al.*, 2006).

De acuerdo a la anterior clasificación, se ubica al AR caracterizado en este trabajo en el tercer grupo, por el hecho importante de modificar la estructura química del almidón fracturándolo a una molécula más pequeña que incrementa su biodisponibilidad en el organismo. Está modificación en su estructura, se logra con el proceso de extrusión, ya que los almidones nativos bajo el proceso de cocción combinado con alta presión, genera una dextrinización de los componentes del almidón (amilosa y amilopectina) provocando la formación de cadenas lineales que favorecen la formación de AR, este a su vez, es fermentado en el colon para generar sustancias biodisponibles en el organismo que además impactan positivamente en la salud (Agustiano *et al.*, 2004).

En 2016, Néder *et al.*, realizaron un estudio sobre el efecto de la cocción por extrusión en la formación de almidón resistente con almidón de maíz nativo. Los

autores reportaron destrucción de la estructura del almidón, la cual causa la pérdida de cristalinidad por la solubilización de la amilosa y el hinchamiento de los gránulos. Encontraron un valor máximo de AR de 1.14g/ 100g, donde la humedad fue el factor que presentó mayor efecto sobre el AR.

Varios factores pueden afectar la formación de AR en alimentos procesados: el contenido de amilosa, la humedad, el tiempo y temperatura de almacenamiento de los geles de almidón, los ciclos de calentamiento/enfriamiento, la presencia de lípidos, la existencia de otros materiales (azúcar, proteínas, etc.) e inhibidores de enzimas (Annison y Topping, 1994; Tester *et al.*, 2006; Sharma *et al.*, 2008).

## **2.2.4 Proteína**

El segundo componente con mayor presencia en los cereales son las proteínas. Este componente difiere notablemente en los distintos cereales e inclusive dentro del mismo cereal de unas cosechas a otras (Daniel y Tribol, 2000). Esto es debido a la fuerte interacción entre el genotipo y las condiciones ambientales que prevalecen durante el desarrollo y la maduración del grano (Wardlaw y Wrigley, 1994).

Los compuestos proteicos del grano se localizan en todos sus tejidos, pero el germen y la capa de aleurona concentran la mayor cantidad de compuestos nitrogenados. La fracción proteica más abundante en la mayoría de los cereales es la que contiene a las prolaminas. Esta fracción proteica adquiere diferentes denominaciones dependiendo del cereal, en el maíz, se denomina zeína y en la cebada, es ordinina (Salgado *et al.*, 2015).

### **2.2.4.1 Efectos de la extrusión sobre la proteína**

Las proteínas durante el proceso de extrusión al igual que el almidón, presentan cambios en sus formas estructurales. Se desnaturalizan, y este fenómeno es muy similar a la de gelatinización del almidón (Valls, 1993). En presencia de calor y

humedad los granos se hidratan y se hinchan. La acción de la cizalla dentro del cilindro de la extrusora permite la ruptura de la membrana y el desenredo de las moléculas, también conduce a la alineación y el estiramiento de estas moléculas (Serna, 2009).

Como resultado de la desnaturalización, la proteína puede someterse a uno (o más) de los siguientes cambios: la proteína se vuelve más digerible, pierden su actividad enzimática aquellas proteínas que son enzimas, se solubilizan de acuerdo al grado de desnaturalización y de sus puntos isoeléctricos, se emulsifican con los lípidos presentes, se gelifican estableciendo zonas de unión en la molécula por la formación de puentes de hidrógeno, por la asociación con azúcares y carbohidratos de la pared, conduce a la formación de nuevos productos, y pérdida de volátiles (aldehídos Strecker) y, genera la presencia de olores y sabores en el alimento (Valls, 1993; Gómez, 2007).

Sin embargo, cuando tiene lugar una cocción más severa, la proteína no se desnaturaliza sencillamente, se endurece, ejerciendo efecto sobre la expansión a través de su capacidad de afectar la distribución del agua en la matriz y a través de su estructura dando como resultado un alimento de textura dura (Gómez, 2007). Asimismo, un procesamiento drástico de cocción puede dañar ciertos aminoácidos, lo que hace que no estén disponibles para la nutrición (Daniel y Triboi, 2000).

#### **2.2.4.2 Perfil de aminoácidos**

Los alimentos de origen vegetal como leguminosas y cereales constituyen un porcentaje importante de las proteínas de la dieta, pero ambos poseen aminoácidos limitantes que disminuyen la eficiencia de su utilización y es necesario complementarlos con otros para mejorar su calidad (Gómez, 2007). Los cereales son pobres en lisina (el maíz también es pobre en triptófano y la cebada en treonina). Por ello, es importante buscar la complementación en aminoácidos

con otros cereales que permita mejorar la calidad biológica de la proteína (Dupont y Altenbach, 2003; Gómez, 2007; Serna, 2009).

Numerosos investigadores han analizado las causas de la baja calidad de las proteínas de maíz, y entre los primeros estudios estuvieron los de Mitchell y Smuts (1932), quienes consiguieron mejoras notorias en el crecimiento humano al complementar dietas de proteínas de maíz con lisina. Estos resultados han sido confirmados a lo largo del tiempo por otros autores (p. ej., Howe, Janson y Gilfillan, 1965), en tanto que otros (p. ej., Bressani, Elias y Braham, 1968) han mostrado que al agregar lisina al maíz mejora levemente la calidad de las proteínas.

Es conveniente recordar que existen 22 aminoácidos conocidos como fisiológicamente importantes, de los cuales el organismo es capaz de sintetizar 14 a partir de un adecuado suministro de nitrógeno (FAO/OMS/UNU 1985).

Los aminoácidos esenciales no pueden ser sintetizados por el organismo a la velocidad y en la cantidad requerida y deben ser suministrados por la dieta. Estos son: leucina, isoleucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina (FAO/OMS/UNU 1985).

Las necesidades de proteínas fueron definidas por el Comité de Expertos FAO/OMS/UNU 1985, como: el nivel más bajo de ingesta de este nutriente para compensar las pérdidas de nitrógeno corporal en sujetos que se mantienen en balance energético con una actividad física moderada. La recomendación de proteínas para los adultos es de 0.75 g por Kg de peso. Esta cantidad aumenta a más de 1.5 g/Kg de peso en los niños pequeños.

## **III. OBJETIVOS**

### **3.1 General**

- ✓ Evaluar fisicoquímica y nutricionalmente una botana de cebada y maíz obtenida del proceso de extrusión.

### **3.2 Específicos**

- ✓ Caracterizar la composición química proximal, de la harina de cebada y maíz para utilizar en el proceso de extrusión.
- ✓ Optimizar el proceso de extrusión a través de un diseño central compuesto, tomando como variable independiente a la humedad de alimentación, temperatura de la matriz (boquilla) y proporción de cebada/maíz; y caracterizar el producto a través de las variables dependientes: índice de adsorción de agua, índice de solubilidad en agua, índice de expansión, densidad aparente y dureza.
- ✓ Evaluar la composición química y parámetros físicos de la botana extrudida optimizada.
- ✓ Analizar el perfil de textura y perfil de aminoácidos de la botana extrudida optimizada.
- ✓ Determinar la digestibilidad del almidón de la mezcla cebada/maíz sin extrudir y la botana optimizada.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Materia prima

Para la realización del presente trabajo se utilizaron como muestras de estudio, cebada de la variedad Esmeralda (*Hordeum vulgare L.*) proveniente del municipio de Apan, Estado de Hidalgo y maíz blanco (*Zea mays L.*), que se adquirió de la central de abastos de Pachuca, Estado de Hidalgo.

#### 4.1.1 Descascarillado y molienda del grano

El primer paso del proceso de molienda fue el descascarillado en una máquina de laboratorio Strong-Scott (Figura 12), esto con el fin de reducir el salvado y al mismo tiempo el contenido de cenizas en la harina. Se utilizó el proceso de molienda húmeda, acondicionada a un 16% de humedad con un reposo de 24 horas. La fórmula que se utilizó para acondicionar el grano a una humedad del 16% en 100 g de materia seca fue:

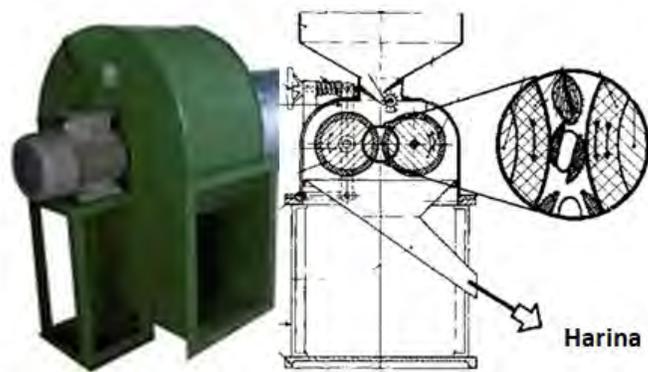
$$\text{Agua en \%} = \frac{100 (H_f - H_i)}{100 - H_f}$$

Donde:

$H_f$  = Humedad requerida (%)

$H_i$  = Humedad inicial (%)

Los granos descascarillados fueron molturados en un molino de laboratorio Chopin CD1 (Figura 13) hasta obtener un producto pulverizado que pasó a través de un tamiz de 35  $\mu\text{m}$ .



**Figura 12.** Descascarilladora de laboratorio Strong-Scott



**Figura 13.** Molino de laboratorio Chopin CD1

#### **4.1.2 Preparación de materias primas**

La mezcla de harinas fue en proporciones de 100:0, 80:20, 50:50, 20:80, 0:100 maíz y cebada siguiendo el diseño central compuesto (Tabla 8), y se ajustó el contenido total de humedad a los valores deseados que fueron de 38 a 45%. Todas las formulaciones se mantuvieron en bolsas de polietileno y almacenadas a temperatura de refrigeración (7°C) durante 24 horas antes del proceso de extrusión.

## 4.2 Métodos

Los análisis que se realizaron, se efectuaron por triplicado para cada una de las muestras.

- **Harinas**

### 4.2.1 Análisis proximal

Las harinas y el producto terminado fueron analizados de acuerdo a la AOAC (2000), humedad (Método 925.01), cenizas (Método 923.03), proteína (Método 954.01), extracto etéreo (Método 920.39) y fibra (992.16).

#### 4.2.1.1 Humedad

A la humedad se le considera como la pérdida de agua que sufre la muestra al ser calentada. Se utilizó un gramo de muestra y se determinó humedad en una termobalanza marca DHAUS MB45.

#### 4.2.1.2 Proteína

Se pesaron 0.5 g previamente desgrasada, esta se colocó en una matraz Kjeldahl, se adicionó 5 g de sulfato de potasio, 0.3 g de sulfato de cobre y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado. Una vez adicionados los reactivos, el matraz se coloca en el digestor Kjeldahl y se calentó gradualmente. Esta reacción convirtió el nitrógeno orgánico e inorgánico en nitrógeno amoniacal. Después de 4 horas de digestión, cuando las muestras presentaron un color transparente, se adicionaron aproximadamente 50 mL de agua destilada a cada muestra para evitar que el sulfato de cobre precipitara. La destilación se llevó a cabo en un destilador utilizando NaOH al 60% para que el amoniaco se liberara. Se utilizaron 20 mL de

ácido bórico al 4% para recibir el destilado. Posteriormente se tituló con HCL 0.01 N que en forma indirecta es proporcional al contenido de nitrógeno.

$$\% N = \frac{V \times N \times 0.014}{P} \times 100$$

$$\% P = \% N \times 5.83$$

Donde

V: mL de ácido

N: normalidad del ácido

P: gramos de muestra

0.014: equivalente volumétrico del N

5.83: factor de conversión para cálculo de proteína en cereales

#### 4.2.1.3 Cenizas

La cantidad de cenizas representa el contenido total de minerales en los alimentos. Las cenizas contienen los elementos inorgánicos, mucho de los cuales son de interés nutricional como es el caso del calcio y fósforo, entre otros. Se pesaron 2 g de muestra en una capsula de porcelana previamente tarada. La muestra se carbonizó sobre la flama de un mechero para posteriormente llevarla a la mufla a 550°C. El calentamiento se suspendió a las cinco horas o hasta que las cenizas se tornaron blancas. En seguida se llevaron a un desecador para enfriarse y finalmente se pesaron. El contenido de cenizas se determinó por la siguiente formula.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(\text{Peso del crisol} + \text{cenizas}) - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

#### 4.2.1.4 Extracto etéreo

Para este método se pesaron 2 g de muestra en base seca en cartuchos de celulosa. Estos se colocaron dentro del aparato de extracción Soxhlet. Se adicionó 100 mL de éter de petróleo a los matraces. El periodo de extracción consistió aproximadamente de 4 horas. Transcurrido el tiempo, los matraces se dejaron secar en la estufa a 50°C durante 2 horas o hasta que alcanzaron peso constante. Finalmente los cartuchos se pesaron para determinar el porcentaje de lípidos con la siguiente formula.

$$\% \text{ de EE} = \frac{\text{Peso del matraz con el extracto} - \text{Peso del matraz}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

#### 4.2.1.5 Fibra cruda

Para la determinación fue necesario trabajar con las muestras desengrasadas. La fibra cruda fue determinada por una digestión secuencial de la muestra con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 1.25% y después con NaOH al 1.25%. El residuo insoluble se obtuvo por filtración, luego fue secado y pesado. Allí se obtiene el peso de la fibra junto al de los minerales. Para obtener el contenido de fibra es necesario incinerar esta muestra, quedando solamente el residuo de las cenizas constituido por los minerales. Por diferencia entre el peso anterior (antes de la incineración) y el de las cenizas se obtuvo el de la fibra cruda; la cual es una medida del contenido de celulosa y lignina en la muestra. El porcentaje de fibra se calcula con la siguiente formula.

$$\% \text{Fibra} = \frac{(\text{Peso del crisol} + \text{cenizas}) - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

- **Botanas extrudidas (Diseño experimental)**

#### 4.2.2 Extrusión

El procesamiento se llevó a cabo con un extrusor de tornillo simple (máquina fabricada en el CICATA-IPN, Querétaro) equipado con dos chaquetas de calentamiento ( $T_1=70^\circ\text{C}$  y  $T_2 =130^\circ\text{C}$ ). La concentración de las harinas de cebada esmeralda y maíz fue variada de acuerdo al diseño experimental desde 0 a 100%. Las temperaturas se fueron en un rango de 130 a  $180^\circ\text{C}$ . Las muestras de harina utilizadas durante el proceso de extrusión con un peso de 300g fueron ajustadas a la humedad deseada desde 38 a 45% de acuerdo con el diseño experimental, utilizando una batidora de laboratorio a una mínima velocidad. El material extrudido fue cortado de manera manual en trozos de aproximadamente 5.0 cm, posteriormente estos fueron deshidratados a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  por 6 h aproximadamente. Los extrudidos posteriormente fueron sometidas a las pruebas físicas de: índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad de agua (ISA), índice de expansión, densidad aparente y fuerza de penetración.

#### 4.2.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño de tres factores donde se estudiaron, la humedad de las mezclas, la temperatura de extrusión y la concentración en la mezcla de harina de maíz y cebada. Se empleó un diseño experimental central compuesto. El modelo estadístico fue:

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + e_i$$

Donde  $Y_i$  es la respuesta genérica,  $X_1$  es la humedad de las mezclas,  $X_2$  es la temperatura de extrusión y  $X_3$  es la concentración de harina entre maíz y cebada.

$b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{33}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ , son los coeficientes de regresión. Se usó un diseño experimental de 20 corridas (Tabla 8).

**Tabla 8.** Diseño experimental central compuesto

Ensayo	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Cebada (%)
1	42	155	20
2	40	170	80
3	42	140	80
4	44	155	80
5	42	180	50
6	38	130	50
7	42	155	50
8	40	170	20
9	42	155	50
10	40	140	50
11	42	155	50
12	45	140	50
13	44	155	100
14	42	155	50
15	40	140	20
16	44	170	20
17	44	170	80
18	42	155	50
19	42	155	0
20	42	155	50

### Análisis proximal

Se siguió la metodología de la AOAC 2000, empleada en el punto 4.2.1

#### 4.2.4 Análisis fisicoquímicos

#### 4.2.4.1 Índice de absorción en agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

El índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA) indican el peso de sólidos secos y el peso del precipitado respectivamente. Fueron determinados de acuerdo al método de Anderson *et al.*, (1982). Se pesaron 2.5 g de muestra extrudida en tubos falcón puestos previamente a peso constante, se hidrataron con 30 mL de agua a 30 °C durante 30 min a agitación constante, se centrifugaron las muestras a 3000 x g durante 10 min usando una centrifuga. Se decantó el sobrenadante y se tomó el peso del sedimento, con lo cual se calculó el porcentaje de absorción de agua, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{IAA} = (\text{Peso gel} / \text{Peso muestra})$$

Para la determinación del ISA, se tomó un alícuota del sobrenadante y se colocó en charolas puestas previamente a peso constante, posteriormente fueron colocadas en una estufa por 24 h a 105 °C, pasado este tiempo se pesaron las charolas y se calculó el porcentaje de solubilidad en agua, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{ISA} = (\text{Peso solubles} / \text{Peso muestra}) \times 100$$

#### 4.2.4.2 Índice de expansión (IE)

Fue determinado de acuerdo al método reportado por Jin *et al.*, (1994). Se realizó tomando 10 muestras representativas de cada corrida realizada y se midieron los diámetros de cada muestra, los cuales fueron divididos entre el diámetro del dado. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$\text{EI} = \text{Diámetro de la muestra} / \text{diámetro de la boquilla del extrusor}$$

#### 4.2.4.3 Densidad aparente (DA)

Para obtener la densidad aparente se usó el método reportado por Onyango *et al.*, 2004. Los materiales extruidos se molieron y tamizaron a través de un tamiz de 35  $\mu\text{m}$ . Fue tarada una probeta graduada de 10 mL y se llenó suavemente de material extruido. El fondo del cilindro fue golpeado ligeramente varias veces suavemente hasta que no hubo más reducción del volumen de la muestra y se pesó. La densidad aparente (DA) de las muestras extruidas se calculó como masa por unidad volumen ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Diez mediciones se realizaron para calcular el promedio.

#### 4.2.4.4 Dureza

Se determinó en piezas extruidas de 5 cm de longitud y 0.5 cm de diámetro, utilizando un texturómetro universal (Texture Analyzer TA-XT2®), en un modo de compresión, para determinar la fuerza requerida para fragmentar el producto extruido y registrar los parámetros de dureza, fracturabilidad, masticabilidad y cohesividad. Se usó una aguja cilíndrica de 2 mm de diámetro con punta plana, corrido a una velocidad de descenso de 10 mm s<sup>-1</sup> y una distancia de penetración de 10 mm. Se realizaron 10 mediciones por tratamiento y se reportó la máxima fuerza de penetración en N.

- **Botana extrudida optimizada**

#### **Análisis proximal**

Se siguió la metodología de la AOAC 2000, empleada en el apartado 4.2.1.

#### **Análisis fisicoquímicos**

Se realizaron las pruebas de IAA, ISA, IE, DA y FP siguiendo las metodologías anteriormente mencionadas, en el apartado 4.2.4.

#### 4.2.5 Almidón resistente

Se determinó de acuerdo a lo reportado por Goñi *et al.*, (1996) con algunas modificaciones. Este método permite determinar el contenido de almidón indigestible en muestras vegetales. Inicialmente se realiza una hidrólisis proteica con pepsina para emular las condiciones estomacales, seguida de la hidrólisis del almidón digestible con  $\alpha$ -amilasa pancreática durante 16 h y a pH cercano a la neutralidad. Una vez eliminados los productos de la hidrólisis tras la centrifugación, en el residuo permaneció la fracción de almidón indigestible. Esta se dispersó en medio alcalino e hidrolizó en su totalidad con amiloglucosidasa, determinándose la glucosa liberada mediante un método enzimático-colorimétrico.

Se pesaron 100 mg de muestra en un tubo de centrifuga, se agregaron 4 mL de la solución  $\alpha$ -amilasa pancreática y se incubaron en un baño de agua a 37°C durante 16 horas con agitación constante. Pasado este tiempo se adicionó 4 mL de una solución de alcohol etílico concentrado, se centrifugo el tubo durante 15 minutos a 3000 rpm y se descartó el sobrenadante; el residuo se lavó dos veces con 8 mL de alcohol etílico al 50% y se descartó nuevamente el sobrenadante. Para determinar las fracciones de almidón resistente (AR) y almidón no resistente (ANR) se siguieron diferentes procedimientos. Para determinar AR se adicionó al residuo sólido 2 mL de KOH 2M, 8 mL de buffer de acetatos (pH 3.8) y 100  $\mu$ L de amiloglucosidasa agitando en el bortex para posterior llevar a incubación por 30 minutos en un baño de agua a 50°C agitando el tubo por cada 10 minutos. Mientras este tiempo transcurría se preparó otro sistema para determinar el ANR. El sobrenadante recolectado se llevó a un matraz y se aforo con buffer de acetatos a 100 mL, se tomó una alícuota de 100  $\mu$ L y se adicionó 10  $\mu$ L de amiloglucosidasa 300 U se agito y llevo a incubación durante 20 minutos a una temperatura de 50 °C. Se preparó un último sistema para servir como estándar de la concentración de glucosa en la muestra de análisis, en un tubo de ensayo se colocaron 50  $\mu$ L de D-glucosa, se agregó 1.5 mL de GOPOD a los sistemas de AR y al estándar y 3 mL al sistema de ANR, se llevaron a incubación por 30 minutos en un baño de agua a

50°C. Se determinó la glucosa liberada por el método enzimático-colorimétrico leyendo las densidades ópticas a 510 nm.

#### 4.2.6 Perfil de aminoácidos

El perfil de aminoácidos se analizó de acuerdo con la metodología de Bidlingmeyer *et al.*, (1984) con modificaciones ligeras. Este análisis se realizó para la mezcla óptima de 60% maíz y 40% cebada sin extrudir y el extrudido optimizado por la técnica de HPLC en el Laboratorio Nacional de Evaluación de Plantas bajo Condiciones Controladas (LAN-Plan TECC) CINVESTAV-IRAPUATO. Se disolvió una muestra de 10 mg en agua o ácido clorhídrico 0,1 M. Se pipeteó un volumen correspondiente a 0,1 a 5,0 µg en un tubo de 50 x 6 mm, y se colocó en un dispositivo de vacío para eliminar el disolvente. Después de secar, se liberó el vacío y se pipetearon 200 µl de HCl 6 N (punto de ebullición constante) que contenía 1% (v/v) de fenol en el fondo del vial de vacío. Las muestras se hidrolizaron a 110 °C durante 24 horas en atmósfera de nitrógeno. Se realizó el estándar de aminoácidos bajo las mismas condiciones. Se colocaron patrones de aminoácidos libres, o muestras individuales, que contenían hasta 25 nmoles de cada aminoácido en los tubos de 50 x 6 mm y se secaron al vacío. Los aminoácidos libres y las muestras hidrolizadas se secaron de nuevo después de 10-20 µl de etanol-agua-trietilamina (TEA) (2: 2: 1) a cada tubo. El reactivo de derivatización se preparó diariamente y consistió en etanol-TEA-agua-PITC (7:1:1:1). Los aminoácidos PTC se formaron añadiendo 20 µl de reactivo a las muestras secas y sellándolas en los viales de vacío durante 20 min a temperatura ambiente. Los reactivos se eliminaron luego al vacío usando la estación de trabajo. Las muestras y patrones se disolvieron en tampón de muestra (acetato de sodio y TEA pH 6,1) y luego se inyectaron en HPLC (Agilent Technologies 1200).

La columna utilizada en este experimento fue Waters 3.9 x 15 mm C18. Los aminoácidos se detectaron a una longitud de onda de 254 nm. Las fases móviles se componían de acetato de sodio 0,14 M con 0,5 ml / l de TEA ajustado a pH 6,1

con ácido acético glacial (disolvente A) y 60% de acetonitrilo en agua (disolvente B). El volumen de inyección fue de 4  $\mu$ l y el gradiente de fases móviles fue el siguiente: inicial, A: B = 96: 4, 0-10 min; A: B = 56: 46, 10-10,5 min; A: B = 0: 100, 10,5-12,50 min; A: B = 96: 4, 12,5-17 min; A: B = 96: 4; el tiempo total de ejecución de HPLC fue de 17 min, el caudal fue de 1 ml / min.

#### **4.2.7 Análisis estadístico**

El análisis de datos para cada variable de respuesta se analizó utilizando procedimientos de regresión múltiple con Design Expert versión 10. 0.3 (Statease Inc., Minneapolis, MN, EE. UU.). Para determinar el efecto de cada variable independiente en las respuestas, los datos experimentales se ajustaron a los modelos seleccionados y los coeficientes de regresión obtenidos

Los datos se expresaron como la media  $\pm$  desviación estándar (SD) de determinaciones por triplicado. Se usaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias de significancia de sus medias. Se usó el software Tukey (versión 0.05) para estas determinaciones.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Caracterización fisicoquímica de la harina de cebada y maíz

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la composición química de las harinas de cebada Esmeralda y maíz. La harina de maíz presentó un contenido de proteína de 10.68%, 6.64% de extracto etéreo, 3.29% de fibra y 2.43% de cenizas. Ortiz y Ramírez (2006), reportaron valores de proteína de 10.09%, 4.71% extracto etéreo, 4.15% fibra y 1.40% cenizas. Fuentes (2012), reportó 9.14% de proteína, 8.16% de extracto etéreo, 1.19% de fibra y 2.13% de cenizas. Miranda *et al.*, (2015), reportaron valores de 8.80% de proteína, 6.58% de extracto etéreo y 1.94% de cenizas. Por otro lado, la harina de cebada esmeralda presentó un contenido de proteína de 10.52%, 4.45% de extracto etéreo, 3.96% de fibra y 2.03% de cenizas. Callejo (2002), reportó 11.0% de proteína, 2.5% extracto etéreo, 4.5% fibra y 3.0% cenizas. López *et al.*, (2007), reportaron contenido de 8.4% de proteína, 2.2% extracto etéreo, 6.1% fibra y 2.2 % cenizas. Los resultados de esta investigación presentaron algunas diferencias con lo reportado por otros autores, lo cual probablemente sea debido a las variaciones del ambiente donde son cultivados (clima y suelo), prácticas agronómicas especialmente la fertilización y el riego, métodos de cosecha, manejo, secado, almacenamiento y transporte, factores que determinan la calidad nutritiva de los granos y por ende de las harinas. Si al cultivar se cuidan condiciones como la fertilización, irrigación, control de plagas, malezas y enfermedades se puede incrementar no solo el rendimiento, sino también la calidad (Sánchez, 2004).

En general, se obtuvo un contenido de proteína muy similar entre la harina de cebada variedad Esmeralda (10.52%) y harina de maíz (10.68%). Sin embargo, la cantidad de proteína puede diferir en los distintos cereales e inclusive dentro del mismo cereal de unas cosechas a otras (Martínez y Jiménez, 2016).

El grano de cebada a diferencia del maíz presenta cáscara y en esta envoltura se encuentra la mayor cantidad de fibra. El contenido de fibra que presenta un grano

de cebada con cáscara es de 7.3% (FUNIBER, 2017) aproximadamente, en este estudio se obtuvo un valor de 4.96%, lo cual indica que el descascarillado del grano fue eficiente. Evidentemente se mostraron mayores diferencias de este análisis con lo reportado por otros autores. Esta diferencia es debido al proceso de descascarillado del grano lo cual influye también en el bajo contenido de cenizas (Navarro *et al.*, 2009). Por otro lado, el maíz presentó 3.29%, otros autores reportaron valores similares, estas mínimas diferencias pueden ser debido a que este grano no sufre un proceso de descascarillado lo cual reduce fluctuaciones en los resultados obtenidos.

En el contenido de lípidos, el maíz presentó mayor contenido (6.64%) que la cebada (4.45%). Los cereales tienen baja cantidad de compuestos lipídicos y se encuentran localizados mayoritariamente en las células del embrión y la aleurona, sin embargo los procesos de molienda y casi todos los de producción de alimentos están enfocados a remover el germen que contiene más del 30% de aceite y es aquí donde los granos disminuyen la cantidad de lípidos por la susceptibilidad que presenta este compuesto de oxidarse o enranciarse (Sánchez, 2004).

El alto contenido de humedad que presentan las harinas son indicativos de un grano sano y de calidad, la cual indica que hay una buena retención de la materia sólida (proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas y cenizas) denominada agua ligada, mientras que el agua libre se retira fácilmente por acción del calor, siendo esta un componente importante en la gelatinización del almidón (Garnero y Pérez, 2006). De acuerdo con Darrah *et al.*, (2003), un porcentaje de humedad superior al 14% los convierte en un sustrato adecuado para el crecimiento de mohos; mientras que, un porcentaje reducido inferior al 10% hará que se vuelvan frágiles y quebradizos. La FAO, por su parte, menciona que los granos son comercialmente aceptables cuando tienen un contenido menor o igual al 15.5%. Las harinas de maíz y cebada presentaron un contenido de humedad de 9.25% y 11.40% respectivamente, por lo que para la FAO son granos de buena calidad.

**Tabla 9.** Análisis proximal de las harinas de cebada esmeralda y maíz

<b>Componente</b>	<b>Cebada Esmeralda (%)</b>	<b>Maíz (%)</b>
Proteína	10.52 ± 0.39 <sup>a</sup>	10.68 ± 0.46 <sup>a</sup>
Humedad	11.40 ± 0.28 <sup>b</sup>	9.25 ± 0.06 <sup>a</sup>
Grasa	4.45 ± 0.45 <sup>a</sup>	6.64 ± 0.34 <sup>b</sup>
Fibra	4.96 ± 0.27 <sup>b</sup>	3.29 ± 0.41 <sup>a</sup>
Cenizas	2.03 ± 0.13 <sup>a</sup>	2.43 ± 0.27 <sup>b</sup>

Los resultados están expresados como la media de determinaciones por triplicados ± la desviación estándar. Los valores están expresados en base seca. Muestras con la misma letra no muestra diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

## 5.2 Análisis fisicoquímicos de los extrudidos

El análisis de las propiedades fisicoquímicas de los alimentos, es uno de los aspectos principales en el aseguramiento de su calidad. Cumple un papel importante en el control del cumplimiento de los parámetros exigidos por los consumidores, llámese textura, sabor, color y olor principalmente, además de permitir evaluar cómo se afectan estructuralmente los componentes de las materias primas de acuerdo a los tratamientos a los que fueron expuestos, tomando en cuenta su valor nutricional. En la Tabla 10, se registran los valores obtenidos de los análisis fisicoquímicos que se realizaron a las 20 botanas extrudidas considerando las condiciones de procesamiento para cada una en el diseño experimental, las cuales fueron tomadas en consideración por el programa Desing expert para optimizar las mejores condiciones de procesamiento que permitiera obtener una botana extrudida con características fisicoquímicas y nutricionales favorables. En la Figura 14, se ilustran los extruidos obtenidos.

**Tabla 10.** Análisis fisicoquímicos de las botanas extrudidas a diferentes condiciones de procesamiento

Ensayo	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Cebada (%)	IAA (g gel/g muestra)	ISA (%)	IE (%)	DA (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (N)
1	42	155	20	6.32 ± 0.015 <sup>g</sup>	1.97 ± 0.054 <sup>a</sup>	0.80 ± 0.017 <sup>a</sup>	5.19 ± 0.059 <sup>c</sup>	30.98 ± 0.024 <sup>ab</sup>
2	40	170	80	3.75 ± 0.022 <sup>b</sup>	6.57 ± 0.018 <sup>h</sup>	1.01 ± 0.060 <sup>a</sup>	9.82 ± 0.013 <sup>f</sup>	53.79 ± 0.165 <sup>d</sup>
3	42	140	80	4.70 ± 0.011 <sup>d</sup>	4.19 ± 0.024 <sup>d</sup>	1.03 ± 0.141 <sup>a</sup>	9.11 ± 0.062 <sup>f</sup>	41.95 ± 0.083 <sup>c</sup>
4	44	155	80	4.08 ± 0.018 <sup>b</sup>	3.74 ± 0.067 <sup>c</sup>	0.93 ± 0.016 <sup>a</sup>	7.15 ± 0.097 <sup>d</sup>	45.13 ± 0.096 <sup>cd</sup>
5	42	180	50	4.25 ± 0.046 <sup>c</sup>	6.37 ± 0.015 <sup>h</sup>	1.25 ± 0.027 <sup>ab</sup>	8.76 ± 0.016 <sup>ef</sup>	40.46 ± 0.044 <sup>c</sup>
6	38	130	50	6.11 ± 0.084 <sup>f</sup>	1.82 ± 0.020 <sup>a</sup>	2.70 ± 0.049 <sup>f</sup>	4.77 ± 0.078 <sup>bc</sup>	25.45 ± 0.063 <sup>a</sup>
7	42	155	50	4.50 ± 0.017 <sup>cd</sup>	5.03 ± 0.103 <sup>f</sup>	1.52 ± 0.011 <sup>c</sup>	5.18 ± 0.031 <sup>c</sup>	37.72 ± 0.118 <sup>b</sup>
8	40	170	20	5.10 ± 0.035 <sup>e</sup>	6.46 ± 0.051 <sup>h</sup>	1.45 ± 0.071 <sup>c</sup>	5.43 ± 0.045 <sup>c</sup>	38.56 ± 0.037 <sup>bc</sup>
9	42	155	50	4.62 ± 0.022 <sup>d</sup>	3.03 ± 0.086 <sup>b</sup>	1.59 ± 0.025 <sup>c</sup>	5.85 ± 0.014 <sup>c</sup>	40.15 ± 0.062 <sup>c</sup>
10	40	140	50	7.25 ± 0.191 <sup>i</sup>	1.81 ± 0.064 <sup>a</sup>	2.58 ± 0.021 <sup>e</sup>	4.40 ± 0.057 <sup>b</sup>	23.98 ± 0.041 <sup>a</sup>
11	42	155	50	6.59 ± 0.043 <sup>gh</sup>	1.87 ± 0.097 <sup>a</sup>	1.82 ± 0.331 <sup>d</sup>	4.46 ± 0.081 <sup>b</sup>	36.77 ± 0.027 <sup>b</sup>
12	45	140	50	4.39 ± 0.026 <sup>c</sup>	5.72 ± 0.042 <sup>g</sup>	1.88 ± 0.014 <sup>d</sup>	8.05 ± 0.137 <sup>e</sup>	41.87 ± 0.093 <sup>c</sup>
13	44	155	100	2.06 ± 0.140 <sup>a</sup>	7.10 ± 0.011 <sup>i</sup>	2.06 ± 0.067 <sup>de</sup>	10.13 ± 0.012 <sup>g</sup>	52.01 ± 0.192 <sup>d</sup>
14	42	155	50	6.32 ± 0.037 <sup>g</sup>	4.09 ± 0.026 <sup>d</sup>	2.18 ± 0.071 <sup>e</sup>	5.42 ± 0.086 <sup>c</sup>	32.10 ± 0.731 <sup>b</sup>
15	40	140	20	7.21 ± 0.028 <sup>i</sup>	3.68 ± 0.058 <sup>c</sup>	2.20 ± 0.149 <sup>e</sup>	5.40 ± 0.154 <sup>c</sup>	26.04 ± 0.246 <sup>a</sup>
16	44	170	20	3.97 ± 0.066 <sup>b</sup>	7.77 ± 0.151 <sup>j</sup>	2.34 ± 0.073 <sup>e</sup>	9.47 ± 0.023 <sup>l</sup>	50.84 ± 0.057 <sup>d</sup>
17	44	170	80	4.35 ± 0.012 <sup>c</sup>	6.85 ± 0.074 <sup>hi</sup>	2.46 ± 0.081 <sup>e</sup>	10.48 ± 0.081 <sup>g</sup>	63.71 ± 0.032 <sup>e</sup>
18	42	155	50	5.52 ± 0.075 <sup>ef</sup>	3.79 ± 0.026 <sup>c</sup>	2.54 ± 0.094 <sup>ef</sup>	4.67 ± 0.025 <sup>b</sup>	35.62 ± 0.046 <sup>b</sup>
19	42	155	0	6.00 ± 0.017 <sup>f</sup>	1.87 ± 0.013 <sup>a</sup>	1.78 ± 0.072 <sup>cd</sup>	4.15 ± 0.127 <sup>b</sup>	22.26 ± 0.024 <sup>a</sup>
20	42	155	50	5.96 ± 0.032 <sup>f</sup>	4.70 ± 0.074 <sup>e</sup>	2.27 ± 0.015 <sup>e</sup>	0.25 ± 0.061 <sup>a</sup>	33.66 ± 0.180 <sup>b</sup>

Los resultados están expresados como la media de determinaciones por triplicados ± la desviación estándar. Los valores están expresados en base seca. Muestras con la misma letra no muestra diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

IAA: Índice de adsorción de agua; ISA: Índice de solubilidad en agua; IE: Índice de expansión.



**Figura 14.** Extrudados obtenidos del diseño experimental. El diámetro (D) está expresado como la media de determinaciones por triplicados  $\pm$  la desviación estándar. E= número de ensayo.

### 5.2.1 Índice de Adsorción de Agua (IAA)

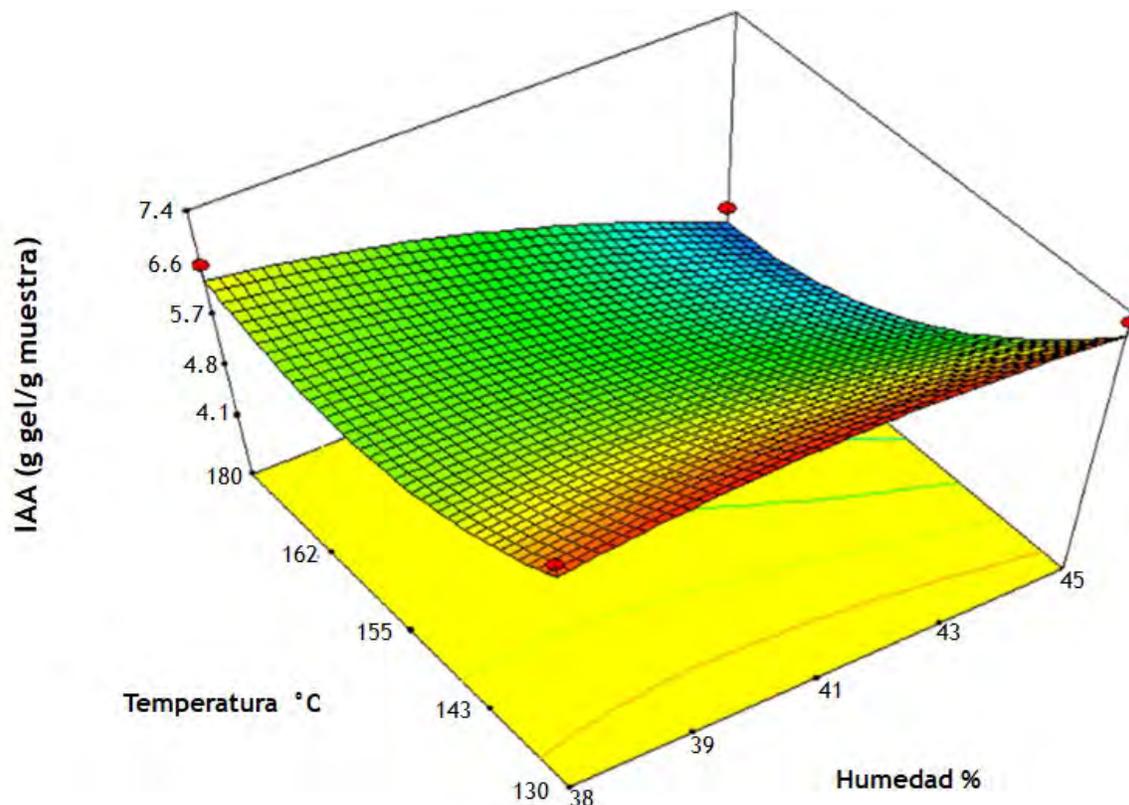
El índice de adsorción de agua es un indicador de la capacidad de los materiales alimenticios para adsorber el agua. En las macromoléculas del almidón, se ha usado como un índice de gelatinización, y en las proteínas como índice de desnaturalización (Rocha y Guzmán *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2010; Lazou y Krokida, 2010).

Se utilizó para el análisis de esta respuesta un modelo cuadrático con valores de  $R^2 = 0.86$  que indica que el 86% de la variabilidad podría explicarse por el modelo. En la Tabla 12 se presenta el análisis de varianza que demostró que el modelo de regresión para el IAA fue significativo ( $p < 0.05$ ), por lo tanto, el modelo puede ser considerado predictivo dentro del alcance experimental de datos analizados en el estudio. El modelo predictivo para IAA puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$\text{IAA} = 91.63067 - 2.16864X_1 - 0.79761X_2 + 0.84159 X_3 + 0.019516 X_1X_2 - 0.018930 X_1X_3 - 4.33651E-004 X_3^2$$

Donde,  $X_1$  corresponde al contenido de humedad,  $X_2$  a la temperatura de extrusión y  $X_3$  a la proporción de cebada en la mezcla. De acuerdo con los coeficientes de regresión y el valor  $p$  (Tabla 11), el término que hizo contribución significativa al IAA fue el efecto lineal de la humedad ( $X_1$ ) y temperatura de la boquilla ( $X_2$ ). Los valores obtenidos de IAA fueron en un rango de 2.06 a 7.25 g gel/ g muestra. Como se muestra en la gráfica de superficie de respuesta (Figura 15), los valores más altos de IAA se encontraron en los tratamientos con concentraciones de 50:50 maíz/cebada a menor humedad (40%) y temperatura por debajo de 140 °C. Esto podrá ser que a menor temperatura, menor es la pérdida de agua por evaporización, por lo tanto hay más agua disponible en la matriz que es adsorbida por los gránulos de almidón y proteína, y que combinado con el daño mecánico que genera la extrusión da lugar a una despolimerización de las moléculas quedando más biodisponibles en el alimento (Guzmán *et al.*, 2015).

El efecto contrario ocurre al aumentar la temperatura y el contenido de humedad, probablemente a que el agua ejerce un efecto lubricante disminuyendo la severidad del proceso provocando una menor degradación del almidón y las proteínas y por consiguiente una menor adsorción de agua (Lizárraga *et al.*, 2013).



**Figura 15.** Superficie de respuesta de índice de adsorción de agua (IAA) en función de la temperatura del dado y humedad de alimentación a una proporción de cebada de 50%. El color rojo indica los mayores valores, el verde los intermedios y el azul, los valores más bajos.

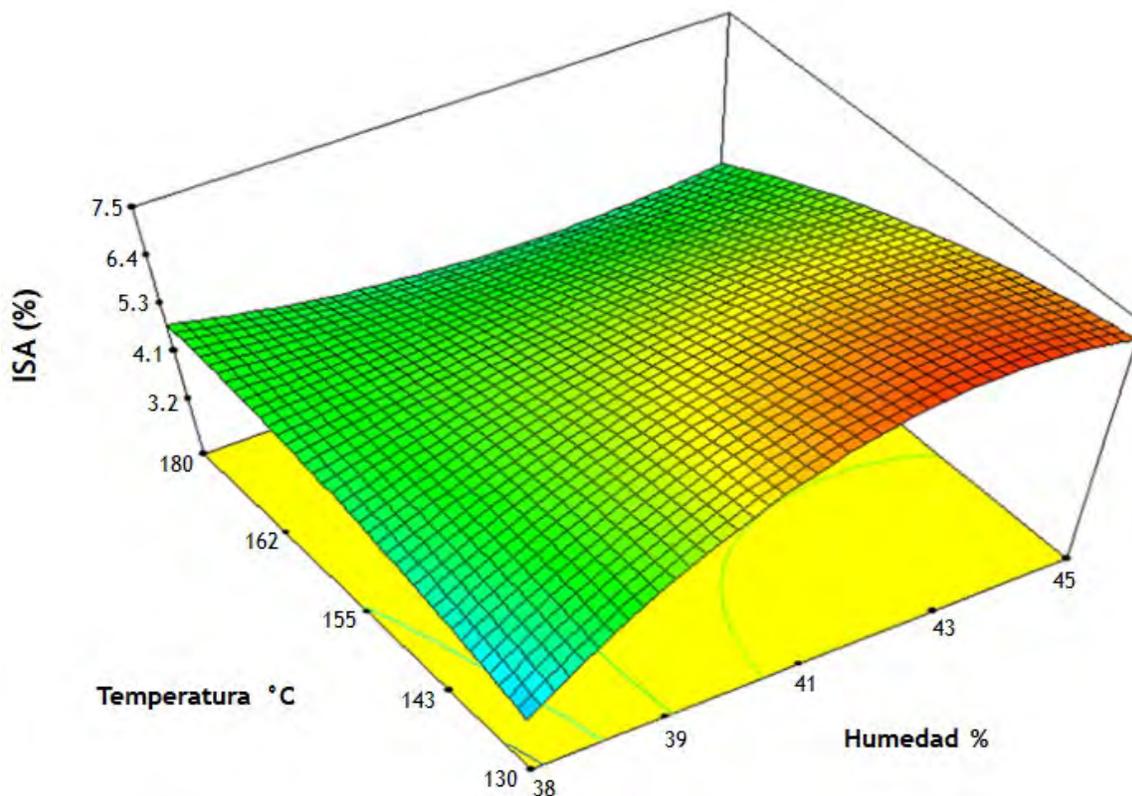
### 5.2.2 Índice de Solubilidad en Agua (ISA)

El índice de solubilidad en agua (ISA) se ha relacionado con la cantidad de sustancias solubles presentes en los alimentos (Grossmann, 2003). Es un indicador de la degradación molecular y grado de modificación del almidón durante procesos térmicos (Van den Einde *et al.*, 2003; Ding *et al.*, 2006).

Se utilizó para el análisis de esta respuesta un modelo cuadrático con valores de  $R^2 = 0.83$ , el cual indica que el 83% de la variabilidad podría explicarse por el modelo. La Tabla 12 presenta el análisis de varianza que demuestra que el modelo de regresión para el ISA fue significativo ( $p < 0.05$ ). Por lo tanto, el modelo puede ser predictivo dentro del alcance experimental de datos analizado en el estudio. El modelo predictivo para ISA es descrito por la siguiente ecuación:

$$\text{ISA} = -4686.43675 + 218.43309 X_1 + 33.28094 X_2 - 13.64343 X_3 - 1.53916 X_1 X_2 + 0.65844 X_1 X_3 - 1.38876 \times 10^{-3} X_2 X_3 - 2.56389 X_1^2 - 1.89570 \times 10^{-3} X_2^2 - 7.31924 \times 10^{-4} X_3^2 + 0.018089 X_1^2 X_2 - 7.77701 \times 10^{-3} X_1^2 X_3$$

De acuerdo con los coeficientes de regresión y el valor  $p$  (Tabla 11), los términos que hicieron contribución significativa al ISA fueron el efecto lineal de la humedad ( $X_1$ ), temperatura de la boquilla ( $X_2$ ) y la interacción entre la humedad de alimentación y temperatura de la boquilla ( $X_1 X_2$ ). El ISA de los extruidos varió entre 1.81 a 7.77 % como se muestran en la gráfica de superficie de respuesta (Figura 16). Los valores más bajos de ISA se encontraron en los tratamientos con concentraciones de 50:50 maíz/cebada, menor humedad (40%) y menor temperatura ( $< 140^\circ\text{C}$ ), a estas mismas condiciones se registraron los valores más altos en el IAA. Esta relación indica que a mayor adsorción de agua en los gránulos de las macromoléculas del extrudido (almidón y proteína, principalmente), menor es el índice de solubilidad. El índice de solubilidad en agua es una medida de los sólidos solubles liberados del interior de los gránulos de almidón cuando comienzan a perder su estructura por efecto de la adsorción de agua. (Van Lengerich y Meuser, 2002; Lazou *et al.*, 2007). El efecto contrario se observó al aumentar el contenido de humedad a menor temperatura, este efecto puede deberse a que la temperatura no fue suficiente para inducir la degradación de los componentes dando como resultado el decremento observado en el ISA (Hernández *et al.*, 2007; Guzmán *et al.*, 2015).



**Figura 16.** Superficie de respuesta de índice de solubilidad en agua (ISA) en función de la temperatura del dado y humedad de alimentación a una proporción de cebada de 50%. El color rojo indica los mayores valores, el verde los intermedios y el azul, los valores más bajos.

### 5.2.3 Dureza

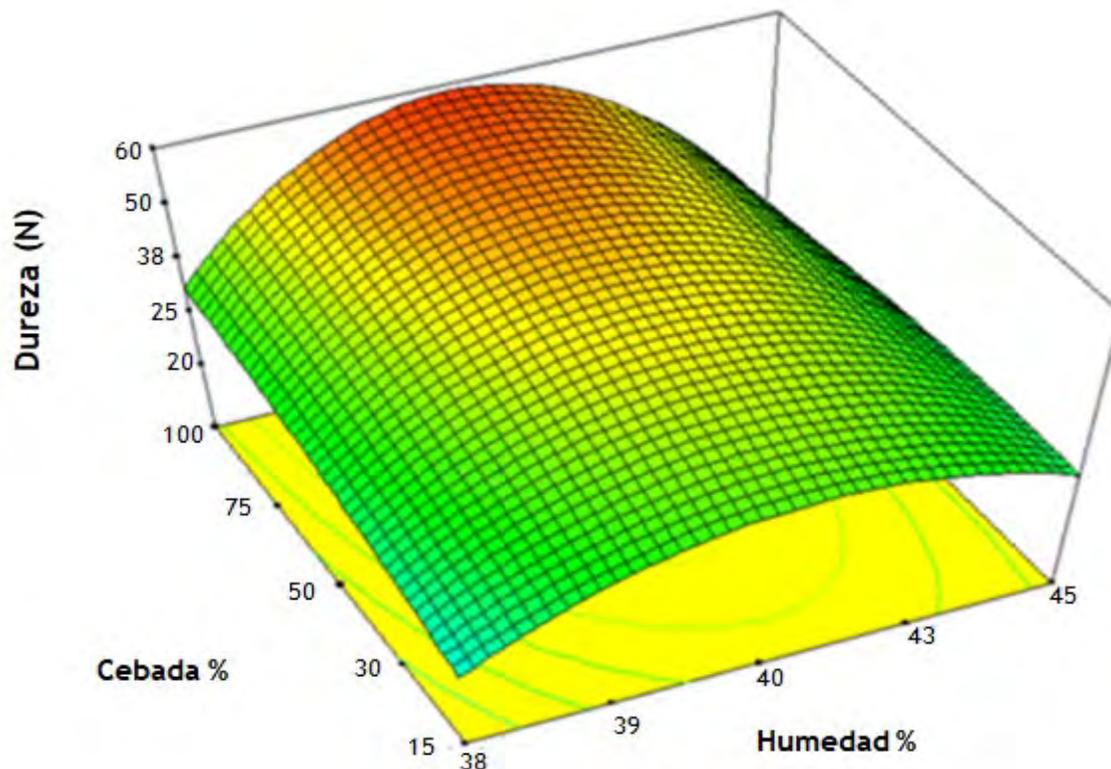
La crujencia es un atributo de textura muy importante para productos como botanas. Un alimento crujiente se caracteriza por poseer una estructura rígida, no deformable, que súbitamente colapsa al aplicar una pequeña fuerza de corte (Meza y Loarca, 2011).

Se utilizó para el análisis de esta respuesta un modelo cuadrático con valores de  $R^2 = 0.79$  el cual indica que el 79% de las variaciones observadas son explicadas por el modelo. El análisis de varianza (Tabla 12) demostró que el modelo de regresión para la dureza es significativo ( $p < 0.05$ ). De acuerdo con los coeficientes de regresión y el valor  $p$  (Tabla 11), los términos que hicieron contribución

significativa a la dureza de los extrudidos fueron el efecto lineal de la humedad ( $X_1$ ), la interacción entre la humedad de alimentación y proporción de cebada ( $X_1X_3$ ) y el efecto cuadrado de la proporción de cebada ( $X_3^2$ ). El modelo predictivo para la dureza es descrito por la siguiente ecuación:

$$\text{Dureza} = -1777.10636 + 59.94261 X_1 + 4.36390 X_2 + 6.77154 X_3 - 0.017819 X_1X_2 - 0.13991 X_1X_3 + 3.78726E-003 X_2X_3 - 0.56395 X_1^2 - 0.011413 X_2^2 - 0.023312 X_3^2 + 9.07245E-005 X_3^3$$

Los valores de dureza se observaron en un rango de 22.26 a 63.71 N. En la gráfica de superficie de respuesta (Figura 17) se observa el efecto de las variables sobre los extrudidos, donde los resultados indican que la humedad y la concentración de cebada presentaron mayor efecto en la dureza. Se observó que los productos con menor fuerza de fractura se obtuvieron con los contenidos menores al 50% en cebada, humedad de menor a 40% y temperatura de 140°C, este efecto podría deberse al contenido de fibra presente en la cebada, ya que este componente tiene la capacidad de ejercer una fuerte interacción con los fragmentos de almidón despolimerizado y proteína formando complejos almidón-fibra, proteína-fibra que dan lugar a productos más densos y por consiguiente exhiben mayor dureza (Lawton *et al.*, 1972; Liu *et al.*, 2000). Los materiales con un alto contenido de fibra muestran un aumento de la densidad aparente después de la expansión (Mendonca *et al.*, 2000; Rocha *et al.*, 2006; Meng *et al.*, 2010).



**Figura 17.** Superficie de respuesta de la dureza en función de la temperatura del dado y humedad de alimentación a una proporción de cebada <50%. El color rojo indica los mayores valores, el verde los intermedios y el azul, los valores más bajos.

En general, las variables de humedad y temperatura de extrusión presentaron mayor efecto sobre los parámetros físicos de IAA e ISA, se observó que un aumento en estas dos variables los valores de IAA disminuyeron, mientras el ISA aumentó. Por otro lado, la proporción de cebada en la mezcla fue la variable con mayor efecto en la dureza, un incremento en la concentración de cebada presentó mayor dureza.

También se analizaron los parámetros de IE y DA a los 20 extrudidos, sin embargo, de acuerdo a la importancia del valor  $p$  (Tabla 11), los modelos de regresión no fueron significativos ( $p > 0.05$ ).

**Tabla 11.** Importancia del valor  $p$  para los parámetros de calidad del extruido

Respuesta	gl.	Fuente	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor $F$	Valor $p$
<b>IAA</b>	6	Modelo	18.91	3.15	3.90	0.0189*
	13	Residual	10.50	0.81		
	8	Falta de ajuste	5.54	0.69	0.70	0.6898
	5	Error	4.96	0.99		
	19	Total	29.40			
<b>ISA</b>	11	Modelo	62.71	5.70	3.63	0.0389*
	8	Residual	12.55	1.57		
	3	Falta de ajuste	2.18	0.73	0.35	0.7910
	5	Error	10.37	2.07		
	19	Total	75.26			
<b>DA</b>	12	Modelo	$4.53 \times 10^{-2}$ *	$3.78 \times 10^{-3}$ *	1.10	0.4716
	7	Residual	$2.42 \times 10^{-2}$ *	$3.45 \times 10^{-3}$ *		
	2	Falta de ajuste	$6.0 \times 10^{-3}$ *	$3.0 \times 10^{-3}$ *	0.83	0.4896
	5	Error	$1.82 \times 10^{-2}$ *	$3.63 \times 10^{-3}$ *		
	19	Total	$6.95 \times 10^{-2}$ *			
<b>IE</b>	12	Modelo	3.14	0.26	0.49	0.8658
	7	Residual	3.72	0.53		
	2	Falta de ajuste	0.19	0.10	0.14	0.8768
	5	Error	3.53	0.71		
	19	Total	6.87			
<b>Dureza</b>	10	Modelo	2744.29	274.43	3.46	0.0376*
	9	Residual	713.25	79.25		
	4	Falta de ajuste	592.71	148.18	6.15	0.0361*
	5	Error	120.54	24.11		
	19	Total	3457.54*			

\* Significativo al  $P < 0.05$ , gl: Grados de libertad.

**Tabla 12.** Análisis de la varianza para los diferentes modelos

	IAA <i>p</i> -value	ISA	Dureza
X1	0.4542*	0.0321*	0.0171*
X2	0.4651*	0.0249*	0.1232
X3	0.1468	0.9782	0.5935
X1X2	0.0798	0.0298*	0.8648*
X1X3	0.0027	0.108	0.0225
X2X3		0.2032	0.6077
X1 <sup>2</sup>		0.0863	0.3248
X2 <sup>2</sup>		0.2399	0.3101
X3 <sup>2</sup>	0.1262	0.0856	0.0053*
X1X2X3			
X1 <sup>2</sup> X2		0.129	
X1 <sup>2</sup> X3		0.1837	
X2 <sup>2</sup> X3			

\* Significativo al  $P < 0.05$

### 5.3 Optimización de los productos extrudidos

Se utilizó una optimización numérica de múltiples respuestas para determinar las condiciones de procesamiento óptimas para evaluar las propiedades físicas (IAA, ISA y dureza) del extruido. Los datos se expresaron como la media  $\pm$  desviación estándar (SD) de determinaciones por triplicado. Se establecieron las condiciones de procesamiento para elaborar una botana extrudida, con temperatura de extrusión de 130°C, proporción de 50:50 maíz/cebada y humedad de la mezcla de 38%. En general, el extruido optimizado presentó características de IAA de 6.26 g gel/g muestra, ISA de 2.40% y dureza de 30 N.

Suarez *et al.*, (2016) coinciden con estos resultados, estos autores estudiaron el efecto de la cocción por extrusión de un alimento de harina de maíz a 130°C y contenido de humedad de 40% reportando valores de IAA de 6.8% y 2.1% de ISA muy semejantes a los obtenidos en este trabajo.

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que la humedad y la temperatura, fueron las variables que más afectaron el IAA e ISA de la botana extrudida, mientras que la humedad y la concentración de cebada fueron las variables que tuvieron mayor efecto en la dureza.

La humedad en la mezcla a extrudir es un parámetro importante para comprender los cambios en la estructura celular y la textura. La fuerza de rompimiento de los productos expandidos es un factor importante tanto para el procesador y el consumidor, si el producto tiene una fuerza de ruptura baja, se rompen fácilmente durante el envasado y la distribución. Por otro lado, si el producto tiene una fuerza de ruptura elevada, los consumidores encuentran el producto difícil de morder y masticar (Maga y Liu, 1993). Liu *et al.*, (2000) reportaron que un alto contenido de humedad reduce la fricción (mecánico-cizalla) entre la masa y la superficie interna del extrusor, la reducción de su temperatura y, por consiguiente la presentación de un impacto negativo en la gelatinización. Ferreira *et al.*, (2011), coincide con estos resultados reportando que alta humedad (superior a 40%) en el material resultó en botanas con una estructura densa de mayor dureza. Estos autores señalaron que esto se produjo probablemente a un menor grado de gelatinización del almidón.

Otro parámetro importante que hizo contribución en los parámetros fisicoquímicos de la botana extrudida fue la proporción de cebada, dado que al incrementarse su contenido en la mezcla (>50%), los extrudidos presentaron mayor dureza. Este efecto pudo deberse al contenido de fibra, dado que la cebada presenta mayor contenido de este componente (4.96%) a diferencia del maíz (3.29%). La fibra tiene la capacidad de formar complejos con el almidón y proteína generando una fuerte interacción entre sus enlaces impidiendo la adsorción de agua y por consiguiente hinchamiento del grano generando botanas con estructura dura después de la extrusión (Valls, 1993).

De lo anterior, se deriva que la textura del producto extrudido es influenciada por la composición del producto. Generalmente, la adición de fibra y proteína da como resultado productos con mayor densidad y dureza. Ainstwhort *et al.*, (2007) investigaron los efectos de la adición de granos de cebada en proporciones de 0 a

30, como fuente de fibra y proteína, en las propiedades físicas y nutricionales de un aperitivo extrudido basado en garbanzo. Estos autores observaron un aumento de la dureza con el aumento de la proporción de cebada.

Mientras tanto, la temperatura también es un factor importante en la cocción por extrusión, ya que elevadas temperaturas puede causar pérdida del agua no ligada del alimento por evaporización, por lo tanto, los componentes quedan más expuestos al tratamiento térmico y consecuentemente sufren daño estructural disminuyendo su valor nutricional. Por otro lado, si la temperatura no es suficiente puede afectar la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas (Fellows, 2000).

### **5.3.1 Composición química proximal del extrudido optimizado**

La Tabla 13 muestra la composición química proximal del extrudido óptimo. Se evaluó la composición de nutrimentos del extrudido tomando como referencia la mezcla de harina maíz y cebada antes de extrudir.

El contenido de humedad se reduce notablemente a consecuencia de la temperatura final alcanzada durante el proceso de extrusión de 10.51% a 2.44%. Según Huber (2001), la humedad deseable para productos expandidos debe ser de 1-2% este factor puede considerarse suficiente para deteriorar los extrudidos con cierta rapidez si no son empacados de manera adecuada. El porcentaje de fibra presento una reducción significativa de 4.12% a 2.98% esta reducción posiblemente se presenta porque la alta presión, la temperatura elevada y la cizalla que se presenta durante la extrusión fragmenta moléculas más grandes de hidratos complejos de carbono en moléculas más pequeñas que son solubles en agua, al igual los fragmentos de fibra se unen para formar complejos grandes con otros compuestos y participan en la reacción de Maillard (Ramírez *et al.*, 2013; Cerón *et al.* 2016). El contenido de cenizas presentó una disminución significativa de 2.92 a 1.33% debido a que durante la extrusión los minerales participan en diferentes interacciones con distintos elementos y algunos nutrientes como las

proteínas y la fibra dietética (Ramírez *et al.* 2013; Cerón *et al.*, 2016). El porcentaje de proteína disminuyó después del procesamiento de 10.29% a 6.80% esto podría explicarse a la formación de complejos almidón-proteína, lo que podría estar impidiendo que la proteína estuviera disponible (Valls, 1993). La grasa presentó disminución significativa de 3.97% a 1.87%, que pueden ser debido a la alta presión combinado con el efecto de cizalla del extrusor lo que provoca la expulsión de grasa del alimento.

**Tabla 13.** Composición proximal de extrudido optimizado

<b>Componente</b>	<b>Mezcla de harinas sin procesar g/100g</b>	<b>Mezcla de harinas producto extruido g/100g</b>
Cenizas	2.92 ± 0.18 <sup>a</sup>	1.33 ± 0.05 <sup>b</sup>
Fibra	4.12 ± 0.47 <sup>a</sup>	2.98 ± 0.45 <sup>a</sup>
Grasa	3.97 ± 0.65 <sup>a</sup>	1.87 ± 0.07 <sup>b</sup>
Proteína	10.29 ± 0.28 <sup>a</sup>	6.80 ± 0.18 <sup>b</sup>

Los resultados están expresados como la media de determinaciones por triplicados ± la desviación estándar. BS= Base seca. Muestras con la misma letra no muestra diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

### 5.3.2 Perfil de aminoácidos

La Tabla 14 presenta el perfil de aminoácidos obtenido en la mezcla de maíz/cebada y el producto extruido desarrollado.

En general, se observó que el perfil de aminoácidos esenciales en el extrudido final se compara satisfactoriamente con el informe de expertos FAO /OMS/ UNU, 2007 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/ Organización Mundial de la Salud/ Universidad de Naciones Unidas) para adultos humanos (Tabla 15). El ácido glutámico, prolina y leucina, son los aminoácidos

con mayor contenido en el extrudido. Los aminoácidos prolina y leucina mostraron aumento significativo luego de la extrusión ( $p > 0.05$ ) de 14.96 y 12.86% respectivamente. Los aminoácidos de azufre, metionina (2.01%) y cisteína (0.42%) también aumentaron debido al procesamiento, sin embargo, son los aminoácidos limitantes en el extrudido, junto con la tirosina (1.71%). El aminoácido lisina disminuyó de 4.64 a 4.04%. Aunque esta pérdida no es significativa ( $p < 0.05$ ), la reducción de lisina como resultado de la cocción por extrusión es bien conocida (Dias y Maga 2004; Ilo *et al.*, 1996; Ruiz-Ruiz *et al.*, 2008), y se le atribuye a la reacción de Maillard y la formación de enlaces entre lisina y glucosa (enlace de tipo CH-N, en lugar de CONH), (Hood-Niefer y Tyler 2010). Gómez (2007), reportó una disminución de lisina en la semilla de algodón luego de la extrusión.

**Tabla 14.** Perfil de aminoácidos de la mezcla de harinas sin extrudir y el extrudido optimizado.

Aminoácido	Mezcla de harinas s/extrudir (g AA/100g Proteína)	Extrudido optimizado (g AA/100g Proteína)
Ac. Aspártico	6.59 ± 0.012 <sup>a</sup>	6.44 ± 0.016 <sup>a</sup>
Ac. Glutámico	19.18 ± 0.027 <sup>a</sup>	12.96 ± 0.031 <sup>b</sup>
Serina	4.39 ± 0.015 <sup>b</sup>	5.16 ± 0.019 <sup>a</sup>
Glicina	4.27 ± 0.022 <sup>b</sup>	5.80 ± 0.026 <sup>a</sup>
Histidina	2.91 ± 0.011 <sup>b</sup>	3.14 ± 0.021 <sup>a</sup>
Arginina	4.26 ± 0.035 <sup>a</sup>	4.13 ± 0.027 <sup>a</sup>
Treonina	3.42 ± 0.062 <sup>b</sup>	4.67 ± 0.058 <sup>a</sup>
Alanina	5.78 ± 0.013 <sup>a</sup>	4.85 ± 0.020 <sup>b</sup>
Prolina	14.23 ± 0.044 <sup>a</sup>	14.96 ± 0.039 <sup>a</sup>
Tirosina	2.06 ± 0.021 <sup>a</sup>	1.71 ± 0.034 <sup>b</sup>
Valina	4.83 ± 0.017 <sup>a</sup>	4.48 ± 0.026 <sup>a</sup>
Metionina	1.45 ± 0.085 <sup>b</sup>	2.01 ± 0.071 <sup>a</sup>
Cisteina	0.08 ± 0.032 <sup>b</sup>	0.42 ± 0.029 <sup>a</sup>

Isoleucina	5.04 ± 0.050 <sup>b</sup>	6.08 ± 0.083 <sup>a</sup>
Leucina	11.53 ± 0.043 <sup>b</sup>	12.86 ± 0.062 <sup>a</sup>
Fenilalanina	5.28 ± 0.029 <sup>a</sup>	6.30 ± 0.035 <sup>a</sup>
Lisina	4.64 ± 0.016 <sup>a</sup>	4.04 ± 0.018 <sup>a</sup>

Los resultados están expresados como la media de determinaciones por triplicados ± la desviación estándar. BS= Base seca. Las letras no comunes indican diferencia significativa.

**Tabla 15.** \*Patrón de aminoácidos en adultos (gAA/100 g proteína)

Aminoácidos Esenciales	Patrón* FAO/OMS/UNU Adulto
<b>Histidina</b>	1.9
<b>Triptófano</b>	3.4
<b>Treonina</b>	1.1
<b>Valina</b>	3.5
<b>Metionina-Cisteína</b>	2.5
<b>Isoleucina</b>	2.8
<b>Leucina</b>	6.6
<b>Fenilalanina</b>	6.3
<b>Lisina</b>	5.8

El proceso de extrusión proporciona la suficiente cocción para desnaturalizar las proteínas, pero debido al corto tiempo de retención puede dañar el valor nutricional de los aminoácidos, esto puede explicar la disminución de los aminoácidos; ácido aspártico (6.44%), arginina (4.13%), alanina (4.85%), tirosina (1.71%) y valina (4.48%) de la botana extrudida.

De acuerdo con algunos investigadores (Mitchell y Smuts, 1932; Howe y Gilfillan, 1965), se consiguió un incremento en el contenido del aminoácido lisina en la botana extrudida, de 2.95% que contiene originalmente el maíz a 4.04% con la adición de cebada. Por otro lado, se complementó el contenido de metionina que es limitante en la cebada de 1.64% a 2.01% en la mezcla con maíz. Estos

resultados indican que la mezcla de maíz/cebada en proporciones iguales (50:50) mejora la calidad de las proteínas en el alimento.

### 5.3.3 Perfil de textura

Se determinaron las propiedades de la botana extrudida relacionadas con la dureza. Cada una de ellas proporcionó información que describe el comportamiento de la textura y por lo tanto son complementarias entre sí (Ramírez, 2004). Como se puede observar en la Tabla 16, la botana extrudida no requirió mayor fuerza para lograr una deformación (30 N) es decir, es crujiente o fácilmente desmorona (14 N). Por esta razón la cohesividad, que es la fuerza con la que están unidas las partículas, presentó un valor de 0.11 que indica que la estructura interna del alimento es porosa y no compacta. La masticabilidad hace referencia al trabajo necesario para desintegrar un alimento, en este caso la botana extrudida, hasta que esté listo para ser deglutido, este parámetro presentó un valor de 6.88 N\*mm, lo que indica que el extrudido se desintegra rápidamente entre los molares. Se observó de acuerdo al diseño experimental que las muestras con mayor contenido de cebada (>50%) presentaron mayor dureza, que se le atribuyó a su contenido en fibra, ya que algunos autores reportan la generación de productos más densos y de mayor dureza en la adición de un materiales altamente proteico y elevado contenido en fibra (Onwulata *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2000). Nath y Chattopadhyay (2007), reportaron un comportamiento similar al aumentar la concentración en harina de soya en la elaboración de una botana por extrusión, aumenta la dureza de esta, en su estudio presentan valores de 35.36 N y 30.89 N para botanas de papa con 20% y 15% de harina de soya respectivamente.

**Tabla 16.** Análisis del perfil de textura instrumental (TPA) para una botana extrudida a base de maíz y cebada.

Parámetro	Valores
Dureza (N)	30 ± 0.17
Fracturabilidad (N)	14 ± 0.24
Cohesividad	0.11 ± 0.06
Masticabilidad (N*mm)	6.88 ± 0.31

Valores expresados como promedio ± desviación estándar. **Newton (N)**: Kg.m/s<sup>2</sup>.

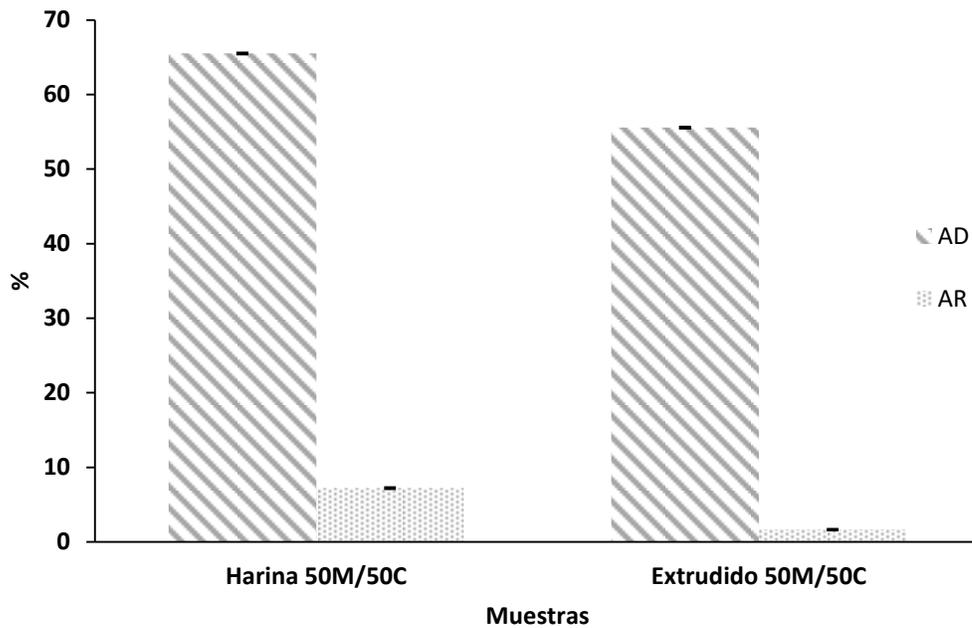
#### 5.3.4 Almidón resistente (AR)

El contenido de AR fue más alto en la mezcla de harina sin extrudir ya que presentó un contenido de 7.21%, mientras que el valor encontrado en la mezcla extrudida fue de 1.65% (Figura 18). Con el proceso de extrusión se esperaría que el contenido de AR se incrementara, ya que en los almidones nativos bajo un proceso de cocción se genera una dextrinización de los componentes del almidón (amilosa y amilopectina) provocando la formación de cadenas lineales esperando favorecer la formación de AR (Agustiano *et al.*, 2004). Sin embargo el comportamiento observado de la muestra optimizada fue menor, esto puede ser debido a que el almidón no logró fragmentarse como consecuencia de la extrusión ya que las condiciones de temperatura, cizalla y velocidad del tornillo utilizadas no fueron tan severas. Manrique (2006) reportó en un estudio sobre almidones no convencionales sometidos a extrusión un efecto significativo en la velocidad de tornillo ya que a medida que esta incrementó se obtuvieron los valores más altos de AR, reportó condiciones de procesamiento de 200 y 250 rpm, mientras que en el presente trabajo se utilizaron 20 rpm. Una mayor velocidad de rotación se traduce en un menor tiempo de residencia y por lo tanto un menor grado de cocción pero simultáneamente es mayor el gradiente de velocidad y por lo tanto es mayor la intensidad de los esfuerzos de corte producidos (González *et al.*, 2002).

Pérez *et al.*, (2007) reportaron un comportamiento similar en mezclas y extrudidos de maíz y frijol lima disminuyendo la concentración de AR con el proceso de extrusión. Estos autores reportan para una mezcla de harina de 50% maíz y 50% frijol lima disminución de 6.79% a 1.35%. Y como se ha sugerido con anterioridad atribuyen este comportamiento a la retrogradación del almidón resistente que se traduce a la pérdida de estructura cristalina sin ruptura del granulo, es decir, los almidones adsorbieron agua resultando un cambio en la conformación de la estructura de los polímeros (amilosa y amilopectina) sin embargo aun así estando susceptibles a la degradación mecánica durante el proceso de extrusión, el esfuerzo de cizalla no fue suficiente para que estos se fragmentaran (Barron *et al.*, 2001; Zazueta *et al.*, 2011). Pese a que en su trabajo Pérez *et al.*, trabajaron con una velocidad de tornillo de 100 rpm puede estar sucediendo el mismo efecto que en la presente investigación, la fuerza de cizalla estuvo por debajo para alcanzar la fragmentación de los gránulos de almidón.

### 5.3.5 Almidón disponible (AD)

En la Figura 18 se muestra el contenido de almidón disponible en las harinas sin procesar (65.51%) y en el extrudido óptimo (55.56%). Tovar *et al.*, (1992) han sugerido que la disminución en el contenido de AD asociado a procesos de extrusión puede deberse a reacciones de transglucosidación, las cuales generan enlaces glucosídicos atípicos que no son reconocidos por las enzimas amilolíticas. Otra posible explicación puede ser la interacción proteína-almidón y fibra-almidón. Holm *et al.*, (1986) observaron en maíz extrudido que los gránulos se encuentran incrustados en la matriz proteica (glutelinas), y en los cuerpos proteicos (zeínas). Adicionalmente, considerando que una característica de la amilosa es su capacidad de interactuar con los lípidos, se puede inferir que en el material extrudido pudiera haber la presencia de estos complejos, los cuales se someten a un ordenamiento conformacional de espiral a hélice, haciéndolos estables térmicamente e insolubles, razón por la cual, posiblemente se redujo la disponibilidad de almidón en esas mezclas (Holm *et al.*, 1986).



**Figura 18.** Contenido de Almidón Resistente (AR) y Almidón Disponible (AD) en la mezcla de harinas crudas y producto extrudido. 50M/50C (proporción maíz y cebada).

Las barras de error representan el valor de la desviación estándar.

## VI. CONCLUSIONES

Las condiciones de extrusión ideales para lograr un incremento del índice de adsorción de agua y consecuentemente, un menor índice de solubilidad en agua y, menor dureza en la botana extrudida son: temperatura de extrusión de 130°C, humedad 38% y proporción de mezcla 50:50 maíz/cebada.

El modelo estadístico utilizado en el análisis de datos del estudio de extrusión fue adecuado para las respuestas IAA, ISA y dureza mostrando un modelo significativo ( $p < 0.05$ ).

La concentración de harina de cebada y la humedad de mezcla fueron las variables más significativas en las variables de respuesta IAA, ISA y dureza.

El perfil de aminoácidos del producto extrudido cumplió satisfactoriamente con el requerimiento de ingesta en adultos que establece el informe de Expertos FAO/OMS/UNU.

El contenido del aminoácido metionina se incrementó significativamente ( $p < 0.05$ ), mientras que el aminoácido lisina no presentó un aumento significativo, sin embargo, su contenido no disminuyó en la mezcla de harina 50:50 maíz/cebada después de la extrusión.

El contenido de almidón resistente disminuyó después del proceso de extrusión, lo cual es atribuible probablemente a la interacción proteína-almidón.

## VII. REFERENCIAS

AOAC International, (2000). Official Methods of analysis of AOAC international.

Abd Karim, A.; Norziah, M.H. and Seow, C. C. (2000). "Methods for the study of starch retrogradation" (Review). Food Chemistry. 71: 9 – 36.

Aguilera, O. M., Reynoso, C. R., Gómez, A. C.A., Uresti, M. R. Ma., & Ramírez, L. J. (2012). Los alimentos en México y su relación con la salud. pp. 177-185.

Agustiano Osornio, J. C. (2004). Obtención de almidón resistente mediante extrusión a partir de almidón de mango *Mangifera indica* L. (Var. Tommy Atkins) (Doctoral dissertation). pp. 42-48.

Anderson, R. A. (1982). Main content area Water absorption and solubility and amylograph characteristics of roll-cooked small grain products. Cereal Chemistry, 59(4), 265-269.

Asp, N. G., Van Amelsvoort, J. M. M., & Hautvast, J. G. A. J. (1996). Nutritional implications of resistant starch. Nutrition research reviews, 9(1), 1-31.

Bautista, J. Ma., Padillab, A. L. F., Camarena-Aguilar, E. A., & JE, B. C. (2009). Desarrollo de Botanas con Características Funcionales Empleando Nopal y Cebada como Fuente de Fibra. pp. 46-58: 63-71.

Bello-Pérez L. A., Méndez-Montevalvo G. y Solorza-Feria J. 2002. Estructura molecular de almidones. Memorias de Investigación 2002. CeProBi-IPN, México.

Bello-Pérez, L. A., González-Soto, R. A., Sánchez-Rivero, M. M., Gutierrez-Meraz, F., & Vargas-Torres, A. (2006). Extrusion of starches from non-conventional sources for resistant starch production. Agrociencia.

Beltrán, M. I. (2011). Tema 1. Estructura y propiedades de los polímeros. Tecnología de los Polímeros.

Biliaderis, C. G. (1991). The structure and interactions of starch with food constituents. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 69(1), 60-78.

Blanshard, J.M.V. (1987). "Starch granule. Structure and function a physicochemical approach" Capitulo 2. *Starch Properties and Potential Critical reports and Applied Chemistry Volumen 13*.

Bressani, R., Elias, L. G., & Braham, J. E. (1968). Suplementación con aminoácidos del maíz y de la tortilla. *Arch. Latinoamer. Nutr*, 18(2), 123-134.

Callejo González, M. J. (2002). *Industrias de cereales y derivados (No. E21/58)*. Ediciones Mundi-Prensa.

Daniel, C., & Triboi, E. (2000). Effects of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat: effects on gliadin content and composition. *Journal of Cereal Science*, 32(1), 45-56.

Dias PM, Maga J (2004) Effect of extrusion on essential amino acids profile and color of whole-grain flours of quality protein maize (qpm) and normal maize cultivars. *Rev Bras Milho e Sorgo* 3:10–20

Ding Q.B., Ainsworth P., Plunkett A., Tucker G. & Marson H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks, *Journal of food engineering*, 73, 142-148.

Dos Santos Fernandez, M.; Wang, S; Ascheri, M.F, Costa, S.A.J. (2002). "Productos extrusados expandidos de misturas de canjiquinha e soja para uso como petiscos". *Pesq agropec bras Brasilia* 37(10):1495-1501.

Badui, S. (2013). *Química de los Alimentos (5a. ed)*. México: Pearson.

Dupont, F. M., y Altenbach, S. B. (2003). Molecular and biochemical impacts of environmental factor son wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Sciencie*, 38, 133-146.

León, A. E., Molina Rosell, C., Gómez Pallarés, M., Brites, C. M., Haros, M., Trigo, M. J. & Collar, C. (2007). De tales harinas, tales panes: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica.

Englyst, H. N., S. M. Kingman, & J. H. Cummings. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46.

FAO (1993). El maíz en la nutrición humana. En *Alimentación y Nutrición*. Nº 25. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 85 pp.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (2003).

FAOSTAT statistics database (last updated May 2004), Agriculture, Rome, Italy.

FAOSTAT data, (2006). <http://apps.fao.org/page/collections?subset=nutrition>. This website provides statistics on commodities, food supply, food balance sheets, food aid, population, and the Codex Alimentarius.

Fellows, J.M. (2000). *Tecnología del procesado de los alimentos: principios y práctica*, segunda edición. Acribia S.A. Zaragoza, España. Pp 24-29.

FIRA Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2016). *Panorama Agroalimentario*. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. pp. 2-4.

Food and Agriculture Organization (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition. Report of a joint WHO/FAO/UNU expert consultation. WHO Technical Report Series, No. 935. Geneva, Switzerland.

Gómez, T. R. (2007). *Extrusión de Semilla de Algodón: Fuente de aminoácidos y vitaminas*.

Gómez-López P., Verdalet-Guzmán I. y Martínez-Bustos F. (2013). Obtención de productos directamente expandidos por extrusión y Botanas de 3ª generación a

base de Chía y almidón de maíz resistente AR4. Universidad Veracruzana. Instituto de Ciencias Básicas.

Goñi, I., L. García-Díaz, E. Mañas, & F. Saura-Calixto. (1996). Analysis of resistant starch: A method for foods and food products. *Food Chem.*

González, R.J.; Torres, R. L. & De Greef, D.M. (2002). "Extrusión-Cocción de Cereales". *Boletim da Sociedade Brasileira de Ciencia y Tecnología de Alimentos.* 36(2): 104-115.

Granfeldt, Y., I. Björck, A. Drew, & J. Tovar. (1992). An in vitro procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume product. *Eur. J. Clin. Nutr.*

Guy, R. (2001). "Materias primas para la cocción por extrusión". En *Extrusión de los alimentos*, Cap. 2. Acribia SA, Zaragoza.

Guzmán-Ortiz, F. A., Hernández-Sánchez, H., Yee-Madeira, H., San Martín-Martínez, E., del Carmen Robles-Ramírez, M., Rojas-López, M., & Mora-

Harper, J.M. (1989). "Food extruders and their applications". *Extrusion Cooking*. Mecier, C; Linko, P; Harper, J.M. editors. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, USA.

Hashimoto J. M., Grossmann, M.V.E. (2003). Effects of extrusion conditions on quality of cassava bran/cassava starch extrudates. *International Journal of Food Science and Technology* 38, 511-517.

Hernández-Díaz J. R., Quintero- Ramos A., Barnard J., and Balandran-Quintana R.R. (2007). Functional properties of extrudates prepared with blends of wheat flour/ pinto bean meal with added wheat bran. *Food Science and Technology International*, 13: 301-308.

Holm, J., I. Björck, A. Drews, and N. G. Asp. (1986). A rapid method for the analysis of starch. *Starch/Stärke*.

Hood-Niefer SD, Tyler RT (2010). Effect of protein, moisture content and barrel temperature on the physicochemical characteristics of pea flour extrudates. *Food Res Int* 43:659–663

Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate polymers*. 45: 253-267.

Howe, E. E., Jansen, G. R., & Gilfillan, E. W. (1965). Amino acid supplementation of cereal grains as related to the world food supply. *The American journal of clinical nutrition*, 16(3), 315-320.

Huber G. Snacks foods from cooking extruders. Lusas E, Rooney L, editors. *Snacks foods processing*. Pennsylvania: Technomic Publishing; (2001). p. 315-368.

INEGI (2016). México, DF, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, disponible en <http://inegi.gob.mx>; consultado en abril del 2018.

Jin Z, Hsieh F, Huff HE (1994). Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt and sugar. *Cereal Chem*.

Lai y Kokini, (1991). Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion. *Biotechnology progress*. 251-260.

Lazou A. E., Michailidis P. A., Thymi S., Krokida M. K. and Bisharat G. I. (2007). Structural properties of corn-legume based extrudates as a function of processing conditions and raw material characteristics. *International Journal of Food Properties*, 10: 721-738.

Lazou, A. and Krokida, Mi. (2010). Functional properties of corn and corn-lentil extrudates. *Food Research International*, 43; 609-616.

Lehman, A. J., Patterson, W. I., Davidow, B., & Hagan, E. C. (1955). Procedures for the appraisal of the toxicity of chemicals in foods, drugs and cosmetics. *Food Drug Cosm. LJ*, 10, 679.

Liang M., Huff H. E. and Hsieh F. H. (2002). Evaluating energy consumption and efficiency of a twin-screw extruder. *Journal of Food Science*, 67; 1803-1807.

Liu Y., Hsieh F., Heymann H. and Huff H.E. (2000). Effect of process conditions on the physical and sensory properties of extruded oat-corn puff. *Journal of Food Science*, 65, 1253-1259.

Lizárraga-Ramírez, M. G., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. J., Delgado-Nieblas, C. I., Ordorica-Falomir, C. A., Jacobo-Valenzuela, N., & Limón-Valenzuela, V. (2013). Características Físicoquímicas y Microestructurales de Botanas Directamente Expandidas por Extrusión Adicionadas de Calabaza (*Cucurbita moschata* D).

López P, Prieto F, Gaytá M y Román A.D. (2007). Caracterización físicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la región centro de México. 1-12.

Manrique-Quevedo y Bello-Pérez. (2006). Producción de almidones pregelatinizados a partir de mezclas de almidones de fuentes no convencionales usando un extrusor de doble tornillo. Tesis de Maestría. Yautepec, Morelos.

Márquez Elías A.K., y Román Gutierrez A.D. (2007). Elaboración y Evaluación de un producto de panificación con harina de cebada.

Meng X, Threinen D, Hansen M, Driedger D. (2010). Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack. *Food Res Int* 43:650–658

Meza Rivera C. D y Loarca Piña G.F. (2011). Elaboración, evaluación nutrimental y nutracéutica de una botana a partir de harinas extrudidas maíz/frijol. Universidad Autónoma de Querétaro.

Millán-Testa, C.E. (2004). Estudios estructurales y moleculares del almidón de fuentes no convencionales: mango (*Mangifera indica*), plátano (*Musa paradisiaca*) y okenia (*Okenia hypogaea*). Tesis de Maestría. Centro de Desarrollo de Productos Bióticos. Yautepec, Morelos, México. 2004. Pp. 47-48.

Miranda Calero S., Esquivel Quezada J., Ruíz Urbina J., Rivers Carcache E. (2015). Análisis proximal de granos de arroz, frijol, maíz y café comercializados en el mercado Roberto Huembes de Managua. Nicaragua, Managua.

Mitchell, H. H., & Smuts, D. B. (1932). The amino acid deficiencies of beef, wheat, corn, oats and soy beans for growth in the white rat. *Journal of Biological Chemistry*, 95, 263-281.

Navarro Cortez, R.O., Castro Rosas, J., Aguilar Palazuelos, E., Rodríguez Miranda, J., Medrano Roldán, H., Delgado Licon, E., Acevedo Sandoval, O.A., y Gómez Aldapa, C.A. (2009). Alimentos botana, aceptabilidad y nutrición humana.

Néder Suarez D., Quintero Ramos A. y Amaya Guerra C.A. (2016). Efecto de la extrusión-cocción en la formación de almidón resistente. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Onyango C., Noetzold H., Bley T., & Henle T. (2004). Proximate composition and digestibility of fermented and extruded uji from maize-finger millet blend. *Lebensm-Wiss u.-Technology*.

Onyango, C., Noetzold, H., Bley, T., & Henle, T. (2004). Proximate composition and digestibility of fermented and extruded uji from maize-finger millet blend. *Lebensm.-Wiss u.-Technology*.

Ortiz Prudencia S. y Ramírez Moreno E. (2006). Determinación de la Composición Química Proximal y Fibra dietaria de 43 variedades criollas de maíz de 7 municipios del Sureste del Estado de Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Parker, R. and Ring, S.G. (2001). Aspects of the physical chemistry of starch. *Journal of Cereal Science*.

Percibaldi, N.M. (2003). Tesis de Magíster en Ciencias y Tecnología de Alimentos. "Variación de la composición lipídica en germen y endospermo de variedades de maíz argentino y su asociación con el proceso de extrusión". UNL-FIQ-ITA.

Pérez-Navarrete C., Cruz-Estrada R. H., Chel-Guerrero L., Betancur-Ancona, D. (2006). Caracterización física de extrudidos preparados con mezclas de harinas de maíz QPM (*Zea mays* L.) y frijol lima (*Phaseolus lunatus* L.). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 5, núm. 2, pp. 145-155.

Ramírez, Jorge Alberto. (2004). Características bioquímicas del músculo, calidad de la carne y de la grasa de conejos seleccionados por velocidad de crecimiento. Tesis doctoral (facultad de veterinaria). Universidad Autónoma de Barcelona.

Rocha-Guzmán, N.E., Gallegos-Infante, J.A., González-Laredo, R.F., Castillo-Antonio, P.A., Delgado-Lincoln, E., Ibarra-Pérez, F. (2006). Functional properties of three common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars stored under accelerated conditions followed by extrusion. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 39, 6–10.

Rodríguez V.M., Sánchez P.M., Jiménez G.E., Ortiz M.A. (2005). *Salud Pública y Nutrición*. Edición especial No. 13-2005 ISSN 1870-0160.

Rodríguez-Miranda j., Ruiz-López I., Hernández-Lara E., Martínez-Sanchez C.E., Delgado-Licon E., and Vivar-Vera M.A. (2010). Development of extruded snacks using taro (*Colocasia esculenta*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. *LWT-Food Science and Technology*, 30, 1-8.

Roldán, R. J. H., Guzmán, O. F.A., & Román, G. A. D. (2016). Valoración de la Calidad de la Cebada Producida en el Estado de Hidalgo. *Food & Biotechnology International Congress*. pp.87

Ruiz-Ruiz J, Martinez-Ayala A, Drago S, Gonzales R, Bentacur-Ancona D, Chel-Guerrero L (2008) Extrusion of hard-to-cook vean (*Phaseolus vulgaris* L.) and quality protein maize (*Zea mays* L.) flour blend. *Food Sci Technol* 41:1799–1807.

SAGARPA. (2016). Consultado en abril de 2018 en [http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/Paginas/JAC\\_00174\\_14.aspx](http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/Paginas/JAC_00174_14.aspx)

Salgado A. M., Herrera D. J. Tzvetanka D. D. (2015). Caracterización de patrones de hordeínas en variedades mexicanas de cebada maltera. Volume 18. Science Direct. pp. 43-51.

Sandhu, K.S.; Singh, N.; Kaur, M. (2004). "Characteristics of the different corn types and their fractions: Physicochemical, thermal, morphological, and rheological properties of starches". *Journal of Food Engineering*. 64:119-127.

Santiago, S. Y. O., Guzmán, O. F.A., Acevedo, S. o. A., & Román, G. A. D. (2016). Agricultura Sustentable: Una Alternativa para Suelos Cebaderos en Hidalgo. Food & Biotechnology International Congress. pp.72

Serna- Saldivar, S. R. O. (2009). Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. D.F. México: AGT Editor.

Shewry, P.R.; Halford, N.G. (2002). "Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization". *Journal of Experimental Botany*, Inorganic Nitrogen Assimilation Special Issue.

Shukla, R., & Cheryan, M. (2001). Zein: the industrial protein from corn. *Industrial crops and products*, 13(3), 171-192.

Stick, R. V. (2001). Carbohydrates. The sweet molecules of life. In: R. V. Stick. (Ed.), Australia.

Tscheuchner, Horst-Dieter. (2001). Fundamentos de Tecnología de los alimentos. Ed. Acribia. Zaragoza, España.

Zazueta-Morales, J.J., Urias- Ruelas, J. Y. (2013). Evaluación Funcional y Sensorial de Alimentos Botana de 2da Generación Extrudidos y Adicionados con Calabaza en Polvo. Universidad Autónoma de Culiacán.

USDA Agricultural Research Service. Nutrient Database <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/>. consultado en Enero 3, 2016.

Valls Porta A. (1993). El proceso de extrusión en cereales y habas de soja. Barcelona.

Van den Einden R.M., Van der Goot A.J. and Boom R.M. (2003). Understanding molecular weight reduction of starch during heating-shearing process. *Journal of Food Science*, 68, 396.

Velázquez Hernández, J.L. y Gallardo Navarro, Y.T. (2005). Establecimiento de las condiciones del proceso de extrusión para la elaboración de botanas a partir de maíz. México, D.F.

Veles J.J. (2004). Caracterización de tostadas elaboradas con maíces pigmentados y diferentes métodos de nixtamalización. Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Santiago de Querétaro, México.

Wardlaw, C.M. y Wrigley, C. M. (1994). Heat tolerance in temperate cereals: An overview. *Australian Journal of Plant Physiology*, 21, 695-703.

Zazueta Morales J.J. *et al.* (2011). Extrusión, Cocción en el Procesamiento de Maíz: Cambios Físicos, Químicos y Calidad de Productos.