

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**TESIS**

**EFECTO DE LA ADICIÓN DE LINAZA Y AMARANTO EN EL  
DESARROLLO DE UN CEREAL EXTRUDIDO INSTANTÁNEO Y SU  
EVALUACIÓN FUNCIONAL MEDIANTE UN MODELO *IN VIVO***

**POR**

**M.C. JAZMIN LETICIA TOBIAS ESPINOZA**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ACENTUACIÓN EN ALIMENTOS**

**MAYO, 2018**

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE LINAZA Y AMARANTO EN EL DESARROLLO  
DE UN CEREAL EXTRUDIDO INSTANTÁNEO Y SU EVALUACIÓN  
FUNCIONAL MEDIANTE UN MODELO *IN VIVO***

**Comité de Tesis**

---

Dr. Carlos Abel Amaya Guerra  
Presidente

---

Dr. Jesús Montemayor Leal  
Secretario

---

Dr. Juan Gabriel Báez González  
Vocal

---

Dra. María Adriana Núñez González  
Vocal

---

Dr. Carlos Javier Aguilera González  
Vocal

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE LINAZA Y AMARANTO EN EL DESARROLLO  
DE UN CEREAL EXTRUDIDO INSTANTÁNEO Y SU EVALUACIÓN  
FUNCIONAL MEDIANTE UN MODELO *IN VIVO***

**Dirección de Tesis**

---

Dr. Carlos Abel Amaya Guerra  
Director

---

Dr. Armando Quintero Ramos  
Director externo

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, especialmente al Departamento de Posgrado de la Facultad de Ciencias Biológicas, por todo el apoyo brindado para llevar a cabo satisfactoriamente mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por el apoyo económico brindado a través de su Sistema Nacional de Becas, que me permitió culminar con el programa de Doctorado en Ciencias.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua, El Instituto Tecnológico de Monterrey, El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, El Centro de Investigación en Materiales Avanzados, por su apoyo en el desarrollo experimental del proyecto de tesis doctoral.

Al Dr. Carlos Amaya Guerra y el Dr. Armando Quintero Ramos, por desempeñarse como mis directores y guías ejemplares, brindándome su apoyo y asesoría durante todo el programa de posgrado.

A los asesores que colaboraron durante el desarrollo de esta tesis doctoral: Dra. María Adriana Núñez, Dr. Juan Gabriel Báez, Dr. Carlos Javier Aguilera González, Dr. Jesús Montemayor Leal, Dra. Esther Pérez Carrillo, Dr. Juan Ángel Ortega Gutiérrez.

A todos mis compañeros del posgrado, por su amistad, compañía, apoyo, consejo, asesoría y todos esos momentos inolvidables que pasamos juntos.

Un agradecimiento muy especial para DIOS, por ser el motor de mi vida y brindarme su Amor, Sabiduría y Fortaleza para poder culminar con esta etapa profesional de mi vida.

A todas esas personas que forman parte de mi vida y me brindan todo su amor y apoyo incondicional todos los días: mi esposo, mis hijos, mis padres, mis hermanos y amigos. Sin ustedes no lo hubiera logrado.

Con Cariño ¡Muchas Gracias!

**M.C. Jazmin Leticia Tobias Espinoza**

## DEDICATORIAS

En Primer lugar quiero dedicar este trabajo a DIOS!

Por brindarme su amor incondicional,  
y ser mi amigo fiel, mi esperanza y mi fortaleza.

A mi esposo y mis hijos,  
por estar siempre ahí para apoyarme, amarme  
y ser el motor de mi vida cada día.

A mis padres, hermanos y amigos,  
porque gracias a ustedes soy lo que soy  
y sin su apoyo no lo hubiera logrado.

*“Nada te turbe,  
Nada te espante,  
Todo se pasa,  
Dios no se muda,*

*La paciencia  
Todo lo alcanza;  
Quien a Dios tiene  
Nada le falta:  
Sólo Dios basta”.*

***Santa Teresa de Jesús***

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
ÍNDICE.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	3
El proceso de extrusión.....	3
Amaranto.....	6
Linaza.....	7
Ácidos grasos esenciales.....	8
Fibra dietética.....	10
Alimentos funcionales.....	12
Digestión de los carbohidratos.....	14
Absorción de carbohidratos.....	15
Metabolismo de carbohidratos.....	16
Digestión de los lípidos.....	18
Absorción de los lípidos.....	20
Metabolismo de los lípidos.....	21
Modelos animales de análisis <i>in vivo</i> .....	24
JUSTIFICACIÓN.....	28
HIPÓTESIS.....	29
OBJETIVO GENERAL.....	30
Objetivos Particulares.....	30
MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
Materia prima.....	31

Formulación de las mezclas.....	31
Proceso de extrusión.....	33
Caracterización de la materia prima y los productos extrudidos.....	34
Fibra dietética, insoluble y soluble.....	34
Densidad aparente.....	34
Índice de expansión.....	35
Índices de absorción y de solubilidad de agua.....	35
Análisis de color.....	36
Cinéticas de absorción en leche para los cereales extrudidos.....	36
Medición de textura: dureza y crujibilidad.....	36
Propiedades de viscosidad en los cereales extrudidos.....	36
Microscopía electrónica de barrido.....	37
Evaluación sensorial.....	37
Formulación de las dietas para el análisis <i>in vivo</i> .....	39
Análisis <i>in vivo</i> , medición de glucosa y lípidos sanguíneos.....	39
Métodos estadísticos.....	40
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>41</b>
Caracterización de la materia prima.....	41
Caracterización de los cereales extrudidos.....	42
Fibra dietética, insoluble y soluble de las mezclas y cereales extrudidos...	43
Índices de absorción y solubilidad de agua.....	45
Densidad aparente.....	46
Índice de expansión.....	47
Textura: dureza y crujibilidad.....	49
Propiedades de viscosidad de los cereales extrudidos.....	50
Cinéticas de absorción en leche .....	52
Microscopía electrónica de barrido.....	55
Análisis de color.....	56
Evaluación sensorial.....	58
Análisis <i>in vivo</i> , perfil de glucosa y lípidos sanguíneos.....	62
Ganancia de peso.....	63

Glucosa.....	64
Triglicéridos.....	66
Colesterol.....	70
CONCLUSIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXOS.....	88
Anexo 1.....	88
Anexo 2.....	91



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Combinación experimental de las variables de proceso.....	32
<b>Tabla 2.</b>	Proporción de ingredientes de los diferentes tipos de mezclas.....	32
<b>Tabla 3.</b>	Dieta control AIN-76, basada en caseína.....	39
<b>Tabla 4.</b>	Composición proximal de la materia prima.....	41
<b>Tabla 5.</b>	Composición proximal de los cereales extrudidos.....	43
<b>Tabla 6.</b>	Contenido de fibra dietética insoluble y soluble de las mezclas sin extrudir.....	44
<b>Tabla 7.</b>	Propiedades físicas y funcionales de los cereales extrudidos.....	47
<b>Tabla 8.</b>	Propiedades de viscosidad de los cereales extrudidos.....	50
<b>Tabla 9.</b>	Análisis de color de los cereales extrudidos.....	57
<b>Tabla 10.</b>	Grado de preferencia para los cereales extrudidos y cereales comerciales.....	58
<b>Tabla 11.</b>	Grado de preferencia para los cereales extrudidos y cereales comerciales altos en fibra.....	60
<b>Tabla 12.</b>	Composición proximal de las dietas preparadas para el análisis <i>in vivo</i> ..	63
<b>Tabla 13.</b>	Contenido de fibra dietética insoluble y soluble de las dietas preparadas para el análisis <i>in vivo</i> .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Esquema de un extrusor.....	4
<b>Figura 2.</b>	Extrusores de tornillo simple y de doble tornillo. Desarrollo de las materias primas en el interior del extrusor.....	5
<b>Figura 3.</b>	Condiciones del proceso de extrusión para el desarrollo del cereal extrudido.....	33
<b>Figura 4.</b>	Metodología para la evaluación sensorial.....	38
<b>Figura 5.</b>	Contenido de fibra soluble e insoluble de los cereales extrudidos.....	44
<b>Figura 6.</b>	Perfil de viscosidad amilográfica de los cereales extrudidos.....	52
<b>Figura 7.</b>	Cinéticas de absorción en leche de los cereales extrudidos.....	53
<b>Figura 8.</b>	Micrografías de los cereales extrudidos.....	55
<b>Figura 9.</b>	Grado de satisfacción para el atributo de sabor de los cereales extrudidos.....	59
<b>Figura 10.</b>	Grado de satisfacción para el atributo de textura de los cereales extrudidos.....	59
<b>Figura 11.</b>	Grado de satisfacción para el atributo de color de los cereales extrudidos.....	59
<b>Figura 12.</b>	Grado de satisfacción para el atributo de sabor en cereales altos en fibra.....	61
<b>Figura 13.</b>	Grado de satisfacción para el atributo de textura en cereales altos en fibra.....	61
<b>Figura 14.</b>	Grado de satisfacción para el atributo de color en cereales altos en fibra.....	61
<b>Figura 15.</b>	Medición del peso corporal a través del tiempo.....	64
<b>Figura 16.</b>	Medición de glucosa en sangre a través del tiempo.....	66
<b>Figura 17.</b>	Medición de triglicéridos en sangre a través del tiempo.....	67
<b>Figura 18.</b>	Medición colesterol en sangre a través del tiempo.....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ALA	Ácido $\alpha$ -linolénico
AL	Ácido linoleico
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
ATP	Trifosfato de adenosina
cp	Centipoise
DA	Densidad aparente
dL	Decilitro
DHA	Ácido docosahexaenoico
EE	Error estándar
EPA	Ácido eicosapentaenoico
FDA	Food and Drug Administration
FDI	Fibra dietética insoluble
FOSHU	Foods for Specified Health Use
HDL	Lipoproteína de alta densidad
IAA	Índice de absorción de agua
IDL	Lipoproteína de densidad intermedia
IE	Índice de expansión
IFIC	Centro de Información Internacional de Alimentos
ILSI	International Life Sciences Institute
ISA	Índice de solubilidad de agua
kV	Kilovoltio
LDL	Lipoproteína de baja densidad
N	Newton
NADH	Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato
NADPH	Nicotinamida adenina dinucleótido
rpm	Revoluciones por minuto
RVA	Rapid Visco Analyser
SDF	Fibra dietética soluble
SEM	Microscopía electrónica de barrido

TNF- $\alpha$	Factor de necrosis tumoral alfa
VLDL	Lipoproteína de muy baja densidad
V <sub>fin</sub>	Viscosidad final
V <sub>max</sub>	Viscosidad máxima
V <sub>min</sub>	Viscosidad mínima
WHC	Capacidad de retención de agua
$\beta$ -glucano	Polisacárido de alto peso molecular
$\mu\text{m}$	Micrómetro

## RESUMEN

La adición de linaza y amaranto sobre los cambios en las propiedades fisicoquímicas, funcionales y microestructurales de cereales extrudidos instantáneos, fue evaluada. Seis diferentes mezclas fueron elaboradas con adiciones de amaranto (30, 40% y 50%) y linaza (10 y 15%), usando sémola de maíz e ingredientes menores como ingredientes suplementarios, enseguida fueron extrudidas en un extrusor de doble tornillo (22% humedad, 272 rpm y 150°C). Los cereales obtenidos presentaron un incremento en el contenido de fibra insoluble y soluble según la proporción de amaranto y linaza. Los cereales extrudidos de las mezclas 3, 4 y 5 presentaron el porcentaje más alto de fibra soluble (1.8-1.9%). Los cereales extrudidos presentaron el valor más bajo de viscosidad (<99.5 cp) y el valor más alto de dureza (5.2 N) cuando el contenido de fibra dietética fue más alto. El incremento del contenido de fibra resultó en un alto índice de solubilidad de agua (ISA) (0.5) y en una disminución del índice de absorción de agua (IAA) (2.5). La incorporación del amaranto y la linaza incrementó la cristalinidad y dio como resultado estructuras más laminadas, largas y compactas. La evaluación sensorial mostró, que según el análisis del grado de satisfacción, los cereales extrudidos presentaron una buena aceptación en cuanto a los atributos de sabor, textura y color en comparación con cereales comerciales altos en fibra, y según la prueba de ordenamiento, es igual de aceptado que los cereales extrudidos comerciales cuando es consumido con leche.

El análisis *in vivo* mostró una diferencia significativa para los niveles de glucosa y triglicéridos sanguíneos en ratas Wistar, entre los diferentes tratamientos ( $P < 0.05$ ). La dieta de la mezcla 3 con mayor contenido de fibra soluble, presentó la reducción más significativa de glucosa en sangre (88.4 mg/dL). Las dietas de las mezclas 5 y 6, con menor contenido de grasa (2.3-2.4%), presentaron los niveles más bajos de triglicéridos. La medición de colesterol no presentó diferencia significativa entre los diferentes tratamientos ( $P > 0.05$ ). La adición de granos altos en fibra como linaza (6.9-9.8%) y amaranto (19.6-34.7%) en cereales extrudidos instantáneos, resultó en un producto con propiedades funcionales y características fisicoquímicas y sensoriales aceptables.

## ABSTRACT

The addition of flaxseed and amaranth on the physicochemical, functional and microstructural changes of instant-extruded cereals was evaluated. Six different mixtures were made with additions of amaranth (30, 40% and 50%) and flaxseed (10% and 15%) using maize grits and minor additives as supplementary ingredients and then extruded in a twin-screw extruder (22% moisture, 272 rpm and 150 °C). The cereals obtained, had insoluble and soluble fiber contents increased with the proportion of amaranth and flaxseed. The extruded cereals of mixtures 3, 4 and 5 had the highest percentage of soluble fiber (1.8-1.9%). Extruded cereals had the lowest viscosity (<99.5 cp) and highest hardness values (5.2 N) whereas the dietary fiber content was highest. Fiber content increase resulted in a higher water solubility index (WSI) (0.5) and decrease the water absorption index (WAI) (2.5). The incorporation of amaranth and flaxseed increased the crystallinity and resulted in more laminated, long and compact structures. The sensory evaluation showed that according to the analysis of the degree of satisfaction, extruded cereals presented a good acceptance in terms of taste, texture and color attributes compared to high-fiber commercial cereals, and according to the ordering test, it is equal of accepted that commercial extruded cereals when consumed with milk.

The *in vivo* analysis showed a significant difference for blood glucose and triglyceride levels in Wistar rats, between the different treatments ( $P < 0.05$ ). The diet of mixture 3 with the highest soluble fiber content showed the most significant reduction of blood glucose (88.4 mg/dL). The diets of mixtures 5 and 6, with lower fat content (2.3-2.4%), had the lowest levels of triglycerides. Cholesterol measurement showed no significant difference between treatments ( $P > 0.05$ ). The addition of high fiber grains such as flaxseed (6.9-9.8%) and amaranth (19.6-34.7%) in instant extruded cereals resulted in a product with functional properties and acceptable physicochemical and sensory characteristics.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una tendencia creciente en la demanda de alimentos procesados que incluyen ingredientes bioactivos como la fibra dietética, debido a la evidencia que existe de sus beneficios en la salud de los consumidores, como la contribución a la reducción de varios tipos de enfermedades crónicas como el cáncer, diabetes mellitus tipo II, enfermedades cardiovasculares y diversos trastornos gastrointestinales (Kaur et al. 2012).

El desarrollo de productos y procesos que incorporen ingredientes altos en fibra sin alterar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de los alimentos procesados, es de especial interés para satisfacer las necesidades actuales de los consumidores. Una alternativa tecnológica muy versátil para la incorporación de este tipo de ingredientes en los productos alimenticios es el proceso de extrusión-cocción, que ha sido ampliamente utilizada para el desarrollo de cereales para desayuno y alimentos instantáneos. Esta técnica es utilizada en situaciones donde el calentamiento de un producto para alcanzar su cocción es conjuntado con el moldeo para dar forma durante la transformación de ingredientes crudos a productos alimenticios terminados, brindando efectos beneficiosos sobre las propiedades nutricionales y sensoriales del producto final (Harper 1981; Rada-Mendoza et al. 2004).

Algunos cereales extrudidos comerciales contienen un valor calórico significativo. Una de las estrategias que ha permitido a la industria alimenticia reducir la densidad energética y producir alimentos más saludables ha sido precisamente la incorporación de ingredientes altos en proteína y componentes bioactivos como la fibra dietética (Robin et al. 2012). Un ejemplo de este tipo de ingredientes es la incorporación de linaza y amaranto. El amaranto contiene un buen equilibrio de aminoácidos, incluido el aminoácido esencial lisina, que no se encuentra en la mayoría de los cereales (Pedersen et al. 1987). La linaza es baja en carbohidratos (azúcares y almidones), alta en fibra dietética y rica en ácidos grasos poliinsaturados, en particular ácido alfa-linolénico (ALA), ácido graso esencial omega-3 y ácido linoleico (AL), ácido graso esencial omega-6 (Morris 2007).

A pesar de los beneficios del amaranto y la linaza, no se ha reportado información importante sobre el efecto combinado de ambos ingredientes en las propiedades

funcionales y fisicoquímicas en productos extrudidos. Por lo tanto, en este estudio fueron desarrollados cereales extrudidos instantáneos hechos a base de linaza y amaranto para evaluar sus propiedades funcionales, fisicoquímicas y sensoriales. Un componente especialmente importante de estos dos granos es la fibra soluble, considerada un ingrediente funcional porque contribuye en un incremento en la viscosidad, causando la gelificación del quimo, el cual actúa como una red para capturar las moléculas de glucosa y lípidos en su paso a través del intestino, dificultando su absorción y por lo tanto disminuyendo los niveles de glucosa y lípidos en sangre, dando como resultado efectos beneficiosos para la salud (Wood 2007). Sin embargo, estos efectos están directamente relacionados a la proporción de estos ingredientes, así como el efecto que ejerce el proceso de extrusión que podría contribuir a una modificación microestructural que incremente el contenido de fibra soluble y disminuya la fibra insoluble, impactando en los niveles de glucosa y lípidos en sangre. Además, todo esto se relaciona con los atributos sensoriales de aceptabilidad del producto. Por ello es importante evaluar y determinar la combinación óptima para la obtención de un cereal extrudido de calidad, con atributos sensoriales aceptables y con un impacto biológico.



## ANTECEDENTES

En la actualidad se tiene un estilo de vida más agitado, esto ha llevado a un gran número de personas a buscar productos alimenticios listos para el consumo, especialmente aquellos que complementan su dieta con ingredientes funcionales que contribuyan a su salud y bienestar. Estos tipos de productos se han hecho populares entre los consumidores debido a su fácil preparación, almacenamiento y atractivas características sensoriales, como textura y sabor (Brennan et al. 2013).

Los cereales extrudidos instantáneos son uno de los productos alimenticios de fácil preparación más importantes y de mayor consumo entre la población; se han convertido en una parte significativa de la dieta humana y pueden influir de forma general en la nutrición. Actualmente existe una gran diversidad de cereales extrudidos instantáneos en el mercado, sin embargo este tipo de productos pueden ser ampliamente modificados, agregando nuevos ingredientes, variando así, su composición, forma, sabor, color, obteniendo cereales más funcionales, agradables y nutritivos (Medrano 2007).

Los alimentos basados en cereales incluyen una parte sustancial del suministro mundial de alimentos; en muchos países en desarrollo, proporcionan hasta el 75% de la energía alimentaria (Kaletunc y Breslauer 2003). Los cereales y granos se consideran una fuente importante de nutrientes: carbohidratos complejos, proteínas, vitaminas, minerales y proporcionan otros compuestos importantes con potencial funcional, como fibra dietética, fitoquímicos, antioxidantes y compuestos fenólicos (Liu 2007).

### **El proceso de extrusión**

La extrusión es un proceso continuo de cocción, de mezclado que a su vez da forma al producto terminado, es considerado como un proceso de bajo costo y muy eficiente en la tecnología del procesamiento de alimentos. Durante el proceso de extrusión los materiales crudos sufren transformaciones estructurales y químicas, como la gelatinización del almidón, la desnaturalización de proteínas, reacciones de degradación de vitaminas y pigmentos, la formación de complejos entre la amilosa y los lípidos. (Ding et al. 2005). Estos complejos se forman durante varios procesos de alimentos, incluyendo la extrusión, su formación es favorecida por la alta viscosidad y tiempos de

residencia largos que ocurren durante el proceso de extrusión; y se forman más probablemente con almidón de alta amilosa y monoglicéridos o ácidos grasos libres (Bhatnagar y Hanna 1994).

La extrusión es una tecnología que se ha desarrollado por más de 60 años. Durante este tiempo se han generado cambios y adaptaciones de esta tecnología para lograr nuevas e imaginativas aplicaciones en alimentos (Harper 1981). Existe una gran variedad de extrusores, pero todos cuentan con tornillo(s) colocados firmemente en un cilindro adecuado que gira por medio de un motor eléctrico. La mezcla de ingredientes, con una humedad entre 15-25%, son alimentados al extrusor y la fricción entre el producto y el (los) tornillo(s) transportadores, incrementan rápidamente la temperatura del producto a 140-170°C durante el tránsito, de 15 a 90 segundos, a través del cilindro; asimismo alrededor del cañón existen distintas celdas que tienen entradas para controlar la temperatura, por medio de vapor o circulación de agua. Para la descarga final, el cilindro esta equipado con un (unos) dado(s) restrictivos(s) que causan presión para formar el producto dentro del anillo del extrusor. Cuando el material cocido extrudido es forzado a través del dado, esta presión es liberada con una pérdida de humedad, un descenso en la temperatura y la expansión del producto final, el cual requiere muy poco secado para alcanzar humedades seguras para su almacenamiento. Las altas temperaturas del proceso, pasteurizan efectivamente el producto, lo que incrementa su estabilidad en vida de anaquel (Harper 1994).

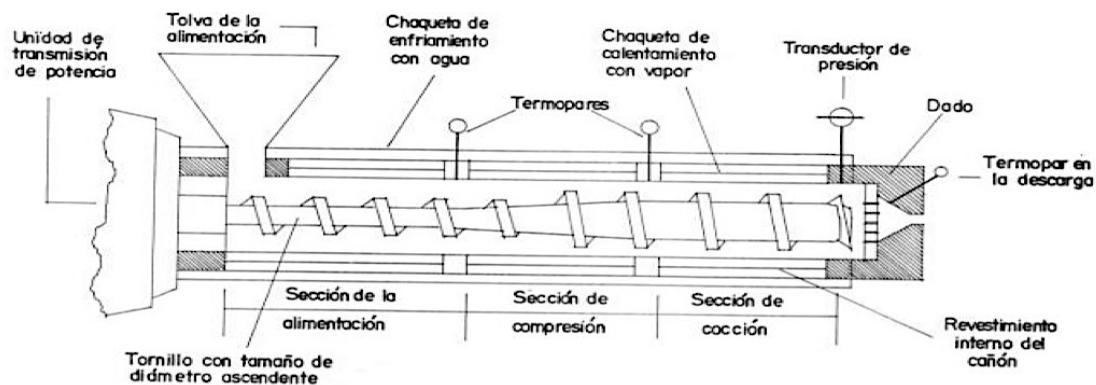
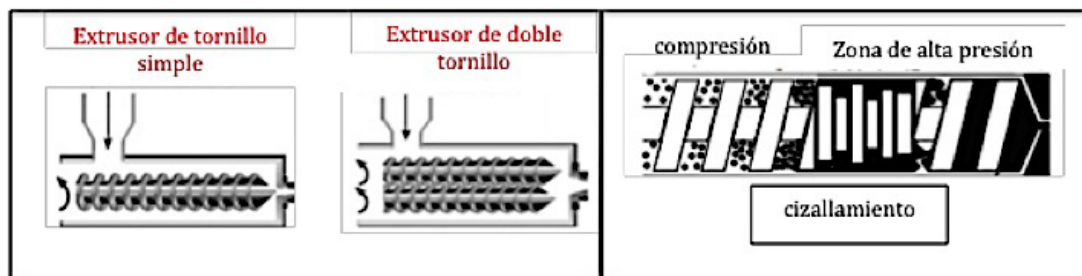


Figura 1. Esquema de un extrusor (Platt 2006)

Durante los experimentos de extrusión es importante evaluar las variables del proceso. Los investigadores del proceso de extrusión estudian los parámetros para los factores primarios: temperatura del cilindro, geometría del dado, modelo del extrusor, composición de los ingredientes alimentarios, humedad de la alimentación, tamaño de partícula de la alimentación, caudal de alimentación, configuración del tornillo y velocidad del tornillo. Estos factores a su vez determinan un conjunto de factores secundarios: la energía mecánica específica, la temperatura del producto y la presión. Estos factores influyen en la viscosidad del alimento dentro del cilindro, el tiempo de residencia del material en el extrusor, el cizallamiento y el proceso previo de los materiales de la alimentación son fuentes importantes de la variación experimental (Muser y Van-Lengerich 1984).



**Figura 2.** Extrusores de tornillo simple y de doble tornillo (Guy 2001). Diagrama del desarrollo de las materias primas en el interior del extrusor (Patil et al. 2016).

Un factor muy importante para la extrusión de un producto es la formulación, donde se debe tomar en cuenta los ingredientes a elegir y el efecto que la extrusión podría tener sobre ellos para determinar si son viables para obtener un producto de buena calidad. Es importante considerar que algunos tipos de redes cohesivas son necesarios para mantener unidos los ingredientes, en la mayoría de los casos, esto se cumple mediante la adición de almidón. Generalmente, el aceite y la grasa son perjudiciales para la expansión del almidón a niveles mayores de 5.6% (Lusas y Riaz 1999).

La adición de fibra dietética durante el proceso de extrusión, especialmente si es insoluble da como resultado productos con menos expansión y crujibilidad, y con mayor densidad y dureza, propiedades menos preferidas por los consumidores. Estas características pueden ser explicadas por la interacción de la fibra con el almidón,

impactando de manera importante en los mecanismos de gelatinización, ya que disminuye la proporción de almidón en la matriz alimenticia, reduciendo así la capacidad de absorción de agua y, a su vez, la viscosidad causada por la gelatinización del almidón, lo que da como resultado una reducción en la expansión de almidón en el producto final (Robin et al. 2012). También se ha informado que el proceso de extrusión causa efectos significativos en el contenido de fibra dietética de los productos extrudidos. Estos efectos incluyen la formación de almidón resistente que puede ocurrir durante la extrusión y la formación de interacciones covalentes entre macronutrientes y componentes insolubles como la fibra, provocando que los extrudidos no sean digeribles por la actividad de la amilasa o proteasa (Esposito et al. 2005).

En este estudio se proponen dos ingredientes interesantes para la formulación de cereales extrudidos instantáneos: la linaza y el amaranto debido a su alto contenido de fibra dietética y ácidos grasos omega 3 y 6, ingredientes funcionales que han sido ampliamente estudiados y han demostrado tener numerosos beneficios para la salud.

### **Amaranto**

El amaranto pertenece a la familia *Amaranthaceae* y existe una amplia variabilidad de especies del género; solo tres de ellas son cultivadas: *Amaranthus hypochondriacus*, originario de México, *Amaranthus cruentus*, originario de Guatemala y el sureste de México y *Amaranthus caudatus*, cuyo origen es América del Sur. El amaranto se puede digerir y absorber mejor después de transformarlo con calor (Cervantes 2007). El uso de las semillas de amaranto tiene diversas aplicaciones en la producción de alimentos, debido a su alto valor nutritivo, la harina obtenida por la molienda de las semillas de amaranto puede utilizarse como sustituto de harina de trigo (al 20%) en tortillas y productos de extrusión, así como del maíz en alimentos hechos a base de maíz, para mejorar la calidad del producto (Zapotoczny et al. 2006). El amaranto contiene de 15-22% de proteína, 58-66% de almidón con una gelatinización a baja temperatura y tamaño granular variable entre 1 y 3.5  $\mu\text{m}$ , dependiendo de la variedad. Las semillas de amaranto contienen de 9-16% de fibra dietética y 3.1-11.5% de lípidos. Se caracterizan por contener altas concentraciones de calcio, fósforo, hierro, potasio, zinc, vitamina E y complejo B, y un bajo nivel de factores anti nutricionales. Así mismo se estudió la

fracción alta en fibra de la semilla de amaranto obteniéndose un 63.9% de fibra insoluble y un 6.86 de fibra soluble (Tosi et al. 2001).

Se han utilizado harinas de amaranto enteras y harinas de amaranto desengrasadas hiperproteicas para suplementar harinas de trigo y así obtener un incremento de proteína y lisina en pan (Tosi et al. 2002). Un estudio indicó que las semillas de amaranto infladas y secas son un valioso ingrediente para la elaboración de cereales para desayuno (Hozova et al. 1997). En otro estudio, se demostró que se obtuvo una reducción del colesterol al alimentar conejos hipercolesterolémicos con bocadillos inflables de amaranto (Plate y Arêas 2002).

### **Linaza**

Otro de los ingredientes utilizados en este estudio es la linaza. El nombre botánico de la linaza, es *Linum usitatissimum* de la familia *Linaceae*. La semilla de linaza es plana y ovalada con un borde puntiagudo. Esta semilla tiene una textura tostada, chiclosa, es de color café y tiene un agradable sabor a nuez (McDonald 1998). La linaza tiene una larga historia de uso alimentario en Europa y Asia. En los Estados Unidos, la semilla y harina de linaza han encontrado una buena aceptación en el mercado, como un componente en algunos cereales, panes especiales, galletas y en aderezos para ensaladas (Carter 1993). En virtud de la presencia de componentes con actividad fisiológica en la semilla de linaza que proveen beneficios a la salud más allá de una nutrición básica, ha sido clasificada dentro de varias categorías como: “alimento funcional”, “alimento bioactivo” y/o “alimento endocrino activo” (Thompson 1993). Entre los beneficios a la salud de la semilla de linaza que han sido reportados están la disminución del riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares y cáncer, actividad antiviral y bactericida, actividad anti-inflamatoria, mejora el tránsito gastrointestinal y previene los síntomas de la osteoporosis y la menopausia (Wiesenfeld et al. 2003).

La linaza es rica en grasa, proteína y fibra dietética. Es rica en ácidos grasos poliinsaturados, particularmente en ácido alfa-linolénico (ALA), el ácido graso esencial omega-3 y el ácido linoleico (AL), el aceite graso esencial omega-6. Estos dos ácidos grasos poliinsaturados son esenciales para los seres humanos porque deben ser obtenidos de las grasas y aceites de los alimentos debido a que nuestro cuerpo no los produce. La

linaza es baja en carbohidratos (azúcares y almidones), suministrando únicamente 1 gramo por cada 100 g (McDonald 1998). Además, esta semilla presenta concentraciones importantes de antioxidantes, tales como, flavonoides, lignanos, ácido fítico, tocoferoles y aporta mucílagos hidrosolubles (Oomah y Mazza 1998).

La fibra dietética representa alrededor del 28% del peso de las semillas de linaza, con una relación de 75% de fibra insoluble y 25 % de fibra soluble o mucílago. Las mayores fracciones de fibra en la linaza son: la celulosa, mucílagos, que son un tipo de polisacárido que se torna viscoso una vez que se mezcla con agua ú otros fluidos; y la lignina, que es una fibra altamente ramificada que se encuentra dentro de las paredes celulares. Dados los beneficios que tiene la fibra dietética soluble y el potencial uso del mucílago de la linaza como goma alimenticia, esta porción ha recibido más atención que la fibra insoluble (Daun et al. 2003; McDonald 1998).

### **Ácidos grasos esenciales**

Los ácidos grasos esenciales (omega-3 y omega-6), constituyen un componente importante de todas las membranas celulares e influyen en la fluidez de la membrana y el comportamiento determinado de los enlaces en las membranas de enzimas y receptores (Das 2006). Sin embargo, para mantener una buena salud, es importante que ambos ácidos grasos estén presentes en una proporción equilibrada. La proporción recomendada de ácidos grasos omega-6 a omega-3 puede estar en el rango de 4:1 a 10:1, y las ingestas de ácidos grasos omega-6 y omega-3 deben representar al menos 3 y 0.5% de la ingesta total de energía, respectivamente (Tolkachev y Zhuchenko 2000; OMS 2003).

Estos ácidos grasos esenciales, sirven como precursores para la síntesis de ácidos grasos poliinsaturados, ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido docosahexaenoico (DHA). Adicionalmente, estos ácidos grasos poliinsaturados, EPA y DHA son metabolizados por las enzimas ciclooxigenasa y lipoxigenasa a eicosanoides, prostaglandinas y leucotrienos. Entre estos eicosanoides, las prostaglandinas de la serie E<sub>2</sub>, los leucotrienos B<sub>4</sub>, derivados del ácido linoleico son los metabolitos clave responsables de muchas enfermedades inflamatorias como las enfermedades cardiovasculares y la artritis, mientras que los eicosanoides y las prostaglandinas de la serie E<sub>3</sub> derivadas del ácido

linolénico tienen respuestas antiinflamatorias (James et al. 2000; Funk 2001; Barcelo-Coblijn y Murphy 2009).

EPA y DHA pueden convertirse endógenamente en diferentes metabolitos conocidos como resolvinas, neuroprotectinas y protectinas. Las resolvinas actúan como potente mediador antiinflamatorio. En particular, funcionan para limitar el grado de inflamación bloqueando las acciones de prostanoïdes y también ayudando a despejar el sitio de la inflamación de los productos de degradación del proceso inflamatorio. Resolvinas y protectinas promueven la recuperación en inflamaciones orales, pulmonares, renales, de la piel, gastrointestinales, etc. El DHA se convierte en neuroprotectinas que han demostrado tener efectos neuroprotectores (Simpolous 2011; Macmohan y Godson 2004).

Una gran cantidad de estudios clínicos han reconocido el gran potencial de los ácidos grasos poliinsaturados n-3 contra los mediadores inflamatorios como las prostaglandinas E<sub>2</sub>, el leucotrieno B<sub>4</sub>, el factor de necrosis tumoral alfa (TNF- $\alpha$ ), la interleucina y las citoquinas. Estos estudios clínicos revelaron que los ácidos grasos poliinsaturados n-3 son útiles en la prevención de las enfermedades coronarias, la aterosclerosis, la artritis reumatoide y el asma (Arend y Dayer 1995; Kremer 2000) Se encontró que la ingesta diaria de 3 g de EPA y DHA durante más de 12 semanas es efectiva para reducir la inflamación de la artritis reumatoide (Kremer 2000). También se ha informado que el consumo de suplementos dietéticos de omega-3 conduce a una reducción significativa del uso de fármacos antiinflamatorios no esteroideos (Arend y Dayer 1995).

Estudios realizados indican que el consumo de ácidos grasos como el omega-3 disminuye la hipercolesterolemia y el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, indicando que la naturaleza anti aterogénica de compuestos como el ácido graso omega-3 es sobre la base de su inhibición en la síntesis de LDL (lipoproteínas de baja densidad), de la aceleración para la eliminación de los LDL y la reducción de triglicéridos en suero, agregación plaquetaria y presión arterial (Steffens 1997). Así mismo en un estudio, se demostró un efecto reductor de lípidos al incluir aceite de linaza en la alimentación de ratas Wistar alimentadas con una dieta hipercolesterolémica. (Vijaimohan et al. 2006). Esto es similar a diversos estudios que demuestran los efectos sobre la atenuación de los niveles de triglicéridos sanguíneos (Djousé et al. 2003; Egert

et al. 2009)

Se ha reportado que la linaza posee propiedades antioxidantes y hepatoprotectoras. Varios estudios demostraron los beneficios reductores del colesterol de la harina de linaza (Cunnane et al. 1993; Ridges et al. 2001; Bathena et al. 2003) otro estudio sobre ratas hipercolesterolémicas alimentadas con dieta suplementada con chutney de linaza (15%) reveló una reducción significativa en el colesterol LDL y el colesterol sérico total, sin presentar cambios en el colesterol HDL (Shakir y Madhusudan 2007).

Varios estudios en humanos han demostrado la capacidad del ALA para reducir la presión arterial diastólica (West et al. 2010), la presión arterial sistólica (Djoussé et al. 2005) y ambas (Takeuchi et al. 2007; Rodriguez-Leyva et al. 2013).

La linaza y su aceite han demostrado reducir el crecimiento de tumores en la etapa posterior de la carcinogénesis; mientras que el precursor de lignanos de mamíferos ejerce el mayor efecto inhibitorio sobre el crecimiento de nuevos tumores (Thompson et al. 1996). El papel del aceite de linaza en la prevención de tumores se atribuye a su alto contenido de ácido alfa-linolénico. La composición de ácidos grasos de los tumores reveló una mayor incorporación de ácido alfa-linolénico que a su vez dio como resultado la supresión del crecimiento de las células tumorales (Gonzalez et al. 1991; Thompson 1996).

Por otro lado, diversos eucosanoides, han tenido un efecto antibiótico, por ejemplo el ácido  $\alpha$ -linolénico elimina rápidamente a *Staphylococcus aureus* (McDonald et al. 1981; Stulnig 2003). El suplemento de aceite de linaza durante aproximadamente 4 semanas dio como resultado la protección de los ratones contra la infección por *Streptococcus pneumonia* (Saini et al. 2010). Por otro lado, el ácido omega-3 ha demostrado modular la acción de los probióticos (*Lactobacillus paracasei*) (Bomba et al. 2003).

### **Fibra Dietética**

Cada uno de los granos (linaza y amaranto) utilizados para la formulación del producto extrudido en este estudio, contienen en común un ingrediente funcional que ha sido extensamente estudiado y ha demostrado tener numerosos beneficios para la salud humana, este ingrediente activo es la fibra dietética. La definición de fibra aceptada por los nutriólogos es la de “polisacáridos y otros componentes asociados de la pared celular



que son resistentes a las enzimas digestivas de los mamíferos”. Esto también incluye a las mucinas, gomas y mucílagos, que no son parte de la pared celular y no son material fibroso. A todos estos componentes se les conoce como “complejo fibroso”. La fibra le da propiedades físicas a los alimentos, generalmente baja la densidad calórica. Hoy en día se sabe que la fibra es de gran importancia en la nutrición humana, la importancia radica en lo referente al tiempo de paso en el tracto gastrointestinal, disponibilidad de nutrientes y reducción en los niveles de colesterol y glucosa en plasma o suero (Ruiz 1991).

La fibra dietética es convencionalmente clasificada en dos categorías en función de su solubilidad en agua: la FDI, fibra dietética insoluble que incluye: celulosa, parte de la hemicelulosa y lignina y la SDF, fibra dietética soluble formada por los pentosanos, las gomas, pectinas y mucílago. La fibra soluble tiene múltiples funciones. Representa un buen sustrato para algunas bacterias lácticas y cepas de bifidobacterias, que son beneficiosas para la salud intestinal (acción prebiótica) (Esposito et al. 2005). El efecto fisiológico que ejerce la fibra soluble fue identificado como un efecto asociado a la capacidad de generar productos de alta viscosidad a una solución de baja concentración, una propiedad soluble de los polisacáridos de alto peso molecular (Wood 2007). Los geles viscosos formados por la fibra soluble en el intestino delgado reducen la velocidad de absorción de glucosa, previniendo los picos de niveles altos de glucosa en sangre. Además, las gomas viscosas y otras fibras solubles pueden reducir los niveles de colesterol mediante el atrapamiento de los ácidos biliares, la excreción aumentada de bilis eventualmente reduce drásticamente los almacenes corporales de colesterol, que son vaciados para sintetizar nuevos ácidos biliares. La FDA (Food Drug and Administration) determinó que la cantidad efectiva diaria de la ingesta de  $\beta$ -glucano es de 3g/día, sin embargo ha habido pocos intentos para establecer una dosis-respuesta que puede variar entre los diferentes grupos de sujetos (Wood 2007). Algunas de las gomas cuyo efecto ha sido estudiado específicamente son las siguientes: pectina, goma guar, xantano y hemicelulosas. Por ejemplo, la goma guar ingerida en una cantidad de 5g/día mejora el índice glucémico y disminuye en un 13% el colesterol en sangre sin hacer decrecer la fracción de lipoproteína de alta densidad, HDL (Fennema, 2000).

El principal efecto fisiológico de la fibra insoluble es la mejora de la peristalsis intestinal

(tránsito intestinal), la cual esta conectada a la capacidad de retención de agua (WHC) y el efecto sobre la viscosidad (Esposito et al. 2005). Contribuye a reducir la ingesta calórica al aumentar el volumen del bolo alimenticio, provocando una sensación de saciedad, aumenta el volumen de las heces fecales y les da una consistencia blanda por lo que mejora su eliminación (Mälkki 2001). Además tiene un efecto protector contra el cáncer colo-rectal mediante la unión de carcinógenos dietéticos. En un estudio donde se evaluaron dieciséis cereales extrudidos, se encontró que unieron al menos un 40% del benzopireno añadido al inicio de una digestión *in vitro* (Camire et al. 1995). Debido a todos los beneficios a la salud que brinda el consumo de fibra dietética, diversos estudios indican que una alta ingesta de alimentos ricos en fibra está directamente relacionado con una baja incidencia de muchos trastornos y enfermedades crónico-degenerativas como: enfermedad intestinal crónica, diabetes mellitus, obesidad, enfermedades cardiovasculares, dislipidemias y cáncer de colón (Mälkki 2001).

### **Alimentos funcionales**

Debido a los ingredientes bioactivos que contienen el amaranto y la linaza y que han sido descrito con anterioridad, es posible desarrollar un alimento funcional por medio de ellos, tal y como se propone en el presente estudio. En la actualidad ha crecido de manera importante el interés por conocer la relación que existe entre la alimentación y las enfermedades, especialmente de aquellas enfermedades que son crónico degenerativas. También se busca conocer los efectos de la nutrición sobre las funciones cognitivas, inmunitarias, capacidad de trabajo y rendimiento deportivo. Los consumidores están cada vez más conscientes de su autocuidado y buscan en el mercado aquellos productos que contribuyan a su salud y bienestar. Siguiendo esta tendencia, el consumidor está recibiendo abundante información acerca de las propiedades saludables de los alimentos, en especial de aquellos alimentos que ejercen una acción benéfica sobre algunos procesos fisiológicos y/o reducen el riesgo de padecer una enfermedad. Estos alimentos, que promueven la salud, han sido denominados genéricamente alimentos funcionales (Sloan 1999).

Por lo tanto, un alimento funcional es aquel que tiene la capacidad de producir efectos benéficos potenciales sobre el buen funcionamiento del cuerpo humano y además es capaz de influir sobre los cambios fisiológicos terapéuticos en enfermedades y estados

patológicos (Dendy y Dobraszczyk 2001). Los alimentos funcionales tienen la característica particular de que algunos de sus componentes afectan funciones del organismo de manera específica y positiva, promoviendo un efecto fisiológico más allá de su valor nutritivo tradicional. Su efecto adicional puede ser su contribución al mantenimiento de la salud y bienestar o a la disminución del riesgo de enfermar (Diplock et al. 1999).

El concepto de desarrollar alimentos no sólo para disminuir las deficiencias nutricionales, sino más bien para proteger la salud de la población fue desarrollado a principios de los años 80 en Japón, a través del Ministerio de Salud, preocupado por los elevados gastos en salud de la población japonesa con alta expectativa de vida. Es así como se creó un marco regulatorio que favorecería el desarrollo de estos alimentos, que en la actualidad se conocen como FOSHU (Foods for Specified Health Use) (Arai 1996).

El Consejo de Nutrición y Alimentación de la Academia de Ciencias de los Estados Unidos los define como “alimentos modificados o que contengan un ingrediente que demuestre una acción que incremente el bienestar del individuo o disminuya los riesgos de enfermedades, más allá de la función tradicional de los nutrientes que contiene” (American Dietetic Association 1999). Por otra parte, el ILSI (International Life Sciences Institute) los define como “alimentos que, por virtud de la presencia de componentes fisiológicamente activos, proveen beneficios para la salud, más allá de la acción clásica de los nutrientes” (Clydesdale 1999).

El Centro de Información Internacional de Alimentos (IFIC) los define como “aquellos productos a los cuales intencionalmente se les adiciona un compuesto específico para incrementar sus propiedades saludables” y define como alimentos saludables a aquellos que, en su estado natural o con un mínimo de procesamiento, tienen compuestos con propiedades beneficiosas para la salud. En este sentido, es acertado que los alimentos naturales que cumplen con estas propiedades se llamen alimentos saludables, y precisar el uso del término funcional a aquellos que han experimentado algún cambio por el procesamiento que conlleve un aumento de sus propiedades saludables. La perspectiva europea de los alimentos funcionales difiere de la norteamericana, que los incorpora en el grupo de los “nutracéuticos”. En consecuencia, en Europa el concepto sólo se aplica a

alimentos que constituyen habitualmente parte de la dieta y excluye su consumo en forma de cápsulas, comprimidos u otras formas farmacéuticas (Milner 2000).

### **Digestión de los carbohidratos**

En la dieta humana existen tres fuentes importantes de carbohidratos. La primera es la sacarosa (azúcar de caña), la segunda es la lactosa, disacárido de la leche, y la tercera está formada por los almidones, grandes polisacáridos presentes especialmente en los cereales. La digestión de los carbohidratos comienza en la boca, cuando se mezclan con la saliva y se encuentran con la ptialina, una alfa-amilasa secretada por la glándula parótida. Esta enzima hidroliza al almidón, convirtiéndolo en un disacárido, la maltosa, y en pequeños polímeros formados por 3 a 9 moléculas de glucosa (maltotriosa, dextrinas alfa límite, etc.). Sin embargo, los alimentos pasan muy poco tiempo en la boca, por lo que solo menos del 5% de los almidones son hidrolizados. La digestión continúa en el fondo del estómago durante un período de hasta una hora, hasta que los alimentos se mezclan con las secreciones gástricas y la actividad queda bloqueada por el ácido de las secreciones del estómago, debido a que esta enzima se desactiva a un pH menor de 4.0, aproximadamente. Para este momento, el porcentaje de almidones hidrolizados hacia maltosa es entre 30 y el 40% (Guyton y Hall 2011).

El proceso de digestión continúa en el intestino delgado, principalmente por acción de la amilasa pancreática, que tiene la misma función de la amilasa salival pero es mucho más potente. A partir de los 15 a 30 min del vaciamiento del quimo hacia el duodeno y de su mezcla con el jugo pancreático, prácticamente todos los almidones han sido digeridos y convertidos en maltosa y otros polímeros muy pequeños de glucosa. Enseguida estos disacáridos y pequeños polímeros de glucosa, son digeridos a monosacáridos, por las enzimas del epitelio intestinal, que contiene cuatro enzimas, lactasa, sacarasa y alfa-dextrinasa. La lactosa se separa en una molécula de glucosa y una de galactosa, la sacarosa lo hace en una molécula de fructosa y otra de glucosa. La maltosa y los pequeños polímeros de glucosa se separan en moléculas de glucosa. Por lo tanto, los productos finales de la digestión de los carbohidratos son todos monosacáridos, que se absorben de inmediato y pasan a la sangre portal (Guyton y Hall 2011).

### **Absorción de carbohidratos**

La mayoría de los carbohidratos se absorben en forma de monosacáridos, sólo una pequeña parte se absorben como disacáridos o moléculas pequeñas. Casi la totalidad de estos monosacáridos es glucosa y se absorben mediante un proceso de transporte activo o de manera secundaria a un transporte activo. Este proceso consiste en un mecanismo de cotransporte con el transporte activo del sodio a través del enterocito. En primer lugar está el transporte activo de sodio a través de las membranas basolaterales hacia los espacios paracelulares, que determina una reducción de sodio en el interior de las células; la reducción del sodio intracelular hace que el existente en la luz intestinal pase al interior de la célula por medio de una difusión facilitada. El sodio se combina primero con una proteína de transporte, la cual no puede llevar a cabo su función si no se combina con una sustancia adecuada, como la glucosa. Por tanto, la glucosa intestinal se combina con la proteína de transporte y tanto el sodio como la glucosa pasan al interior de la célula. Enseguida, otras proteínas y enzimas de transporte facilitan la difusión de la glucosa hacia el espacio paracelular a través de la membrana basolateral (Hediger y Rhoads 1994; Wheeler y Hinkle 1985).

Cuando los disacáridos y trisacáridos entran en contacto con el ribete en cepillo, las enzimas digestivas unidas a las membranas de las microvellosidades provocan su hidrólisis y transformación en glucosa, aumentando su concentración. Esta concentración elevada de glucosa tiene un efecto adicional, incrementando la velocidad del transporte de glucosa hacia el interior del enterocito y hacia todos sus pasos a través de la célula y hacia el espacio paracelular. Cuando la glucosa alcanza el espacio paracelular, su concentración aumenta mucho en este lugar, provocando una presión osmótica elevada en el espacio paracelular, que favorece el paso osmótico de agua desde la luz intestinal a través de las uniones celulares y directamente hasta el espacio paracelular sin necesidad de atravesar el interior de los enterocitos. Este mecanismo es llamado *arrastré por el disolvente*. Cuando las concentraciones de glucosa en la luz intestinal son elevadas, la cantidad absorbida por este mecanismo puede llegar a duplicar o triplicar a la que se absorbe directamente al enterocito por el mecanismo de cotransporte con el sodio; sin embargo, cuando la concentración de carbohidratos en la luz del intestino es baja, la absorción por este mecanismo no es importante. En el caso

de la absorción de otros monosacáridos, el transporte de la galactosa es muy similar al de la glucosa. El transporte de la fructosa no se hace por el mecanismo de cotransporte con el sodio, si no que este monosacárido se absorbe por difusión facilitada a todo lo largo del enterocito, sin acoplarse al transporte del sodio. Además, la mayoría de la fructosa es convertida en glucosa mientras se encuentra en el enterocito (Guyton y Hall 2011).

### **Metabolismo de carbohidratos**

De los productos finales de la digestión de los carbohidratos, la glucosa es el mayor, representando aproximadamente el 80% de ellos. Asimismo, tras la absorción, gran cantidad de fructosa y la mayoría de la galactosa se convierten en glucosa en el hígado. Antes de que las células puedan utilizar la glucosa, debe transportarse a través de la membrana celular hasta el citoplasma, sin embargo, la glucosa no se puede difundir a través de los poros de la membrana debido a su alto peso molecular, por lo que tiene que pasar mediante el mecanismo de difusión facilitada, que consiste en la unión de la glucosa a moléculas proteicas transportadoras que pueden penetrar a través de la matriz lipídica de la membrana celular. De esta forma, la glucosa puede ser transportada de un lado a otro de la membrana y después liberarse. Si la concentración de glucosa es mayor en un lado de la membrana que en el otro, se transportará más glucosa desde el área de concentración elevada que en la dirección opuesta. La insulina aumenta enormemente la intensidad del transporte de la glucosa, hasta diez veces o más que cuando no hay insulina. Por lo tanto, las cantidades de glucosa que pueden difundir al interior de la mayor parte de las células del organismo en ausencia de insulina, con excepción del hígado y el cerebro, son muy pequeñas para suplir la cantidad de glucosa normalmente necesaria para el metabolismo energético. Después de entrar en la célula, la glucosa se combina con un radical fosfato, esta fosforilación es favorecida por la enzima glucocinasa del hígado o la hexocinasa de la mayor parte de las otras células. Esto tiene como finalidad capturar la glucosa en la célula, debido a que de esta manera, la glucosa no difundirá de nuevo al exterior (Guyton y Hall 2011).

Tras su absorción en las células, la glucosa se puede utilizar de inmediato para liberar energía a las células o almacenarse en forma de glucógeno, determinadas células pueden

almacenar grandes cantidades como las células hepáticas y las células musculares. La glucogénesis es el proceso de formación del glucógeno, en este proceso primero la glucosa-6-fosfato se convierte en glucosa-1-fosfato; después se convierte en uridina difosfato glucosa, que después se convierte en glucógeno. Son necesarias varias enzimas específicas para producir estas conversiones, y cualquier monosacárido que se puede convertir en glucosa puede entrar en las reacciones. Por otro lado, la glucogenólisis es el proceso de descomposición del glucógeno almacenado en la célula para volver a formar glucosa, en el cuál, cada molécula de glucosa sucesiva de cada rama del polímero es escindida mediante una fosforilación, catalizada por la enzima fosforilasa (Ferrer et al. 2003).

#### *Glucólisis, formación del ácido pirúvico*

Los medios más importantes por los que se libera energía de la molécula de glucosa los inicia la glucólisis. Después los productos finales de la glucólisis se oxidan para proporcionar energía. Este proceso consiste en la partición de la molécula de glucosa para obtener dos moléculas de ácido pirúvico, esto se produce en diez pasos sucesivos de reacciones químicas y cada paso es catalizado por, al menos, una enzima proteica específica. Primero, la glucosa se convierte en fructosa 1,6-fosfato y después se escinde en dos moléculas de tres átomos de carbono, cada una de las cuales se convierte en ácido pirúvico a través de cinco pasos sucesivos. El siguiente paso en la degradación de la glucosa es el transporte facilitado de las dos moléculas de ácido pirúvico derivadas a la matriz de la mitocondria, y después la conversión de éstas en dos moléculas de acetil-coenzima A (acetil-CoA) (Guyton y Hall 2011).

#### *Ciclo del ácido cítrico*

El siguiente paso en la degradación de la molécula de glucosa, es el ciclo del ácido cítrico o también llamado ciclo de Krebs, el cual consiste, en una secuencia de reacciones químicas en la que la porción acetil de la acetil-CoA se degrada a dióxido de carbono y átomos de hidrógeno. Los átomos de oxígeno liberados son oxidados posteriormente, liberando cantidades importantes de energía en forma de ATP (trifosfato de adenosina). Todas estas reacciones se producen en la matriz de la mitocondria. En la

parte inicial del ciclo, la acetil-CoA se combina con el ácido oxaloacético para formar ácido cítrico. Se libera la porción coenzima A de la acetil-CoA y se puede utilizar una y otra vez para la formación todavía mayores de acetil-CoA a partir del ácido pirúvico. La porción acetil, se convierte en parte integral de la molécula de ácido cítrico. Durante los sucesivos pasos del ciclo de Krebs, se añaden varias moléculas de agua, y se liberan dióxido de carbono y átomos de hidrógeno. Al final, por cada molécula de glucosa metabolizada, pasan dos moléculas de acetil-CoA por el ciclo del ácido cítrico, y por cada una se forma una molécula de ATP (Krebs 1948-1949).

### *Fosforilación oxidativa*

A pesar de todas las complejidades de la glucólisis, el ciclo del ácido cítrico, la deshidrogenación y la descarboxilación, se forman cantidades pequeñas de ATP durante todos estos procesos. En cambio, casi el 90% del ATP formado en el metabolismo de la glucosa se forma durante la posterior oxidación de los átomos de hidrógeno que se liberaron durante los primeros estadios de degradación de la glucosa. La oxidación del hidrógeno se lleva a cabo por una serie de reacciones catalizadas por enzimas en la mitocondria que desdoblan cada átomo de hidrógeno en un hidrogenión y un electrón, y utilizan los electrones finalmente para combinar el oxígeno disuelto en los líquidos con las moléculas de agua y formar iones hidroxilo. Enseguida, el hidrógeno y los iones hidroxilo se combinan para formar agua. Durante la secuencia de reacciones oxidativas, se liberan grandes cantidades de energía para formar ATP. Esta formación de ATP se conoce con el nombre de fosforilación oxidativa, y se produce completamente en la mitocondria mediante un proceso llamado mecanismo quimiosmótico (Senior 1988).

### **Digestión de los lípidos**

Las grasas más abundantes de la dieta son los triglicéridos, moléculas formadas por un núcleo de glicerina y tres ácidos grasos. En la dieta habitual también existen pequeñas cantidades de fosfolípidos, colesterol y ésteres de colesterol. La lipasa lingual, secretada por las glándulas linguales, digiere una pequeña cantidad de triglicéridos en el estómago ( $\leq 10\%$ ). En realidad, la digestión de todas las grasas tiene lugar principalmente en el intestino delgado (Guyton y Hall 2011).



El primer paso en la digestión de las grasas consiste en reducir el tamaño de los glóbulos de grasa para que las enzimas hidrosolubles puedan actuar sobre sus superficies. Este proceso se conoce como emulsión y se produce por la acción de la *bilis* y por la agitación a la que es sometido el quimo en el tracto gastrointestinal. La *bilis*, es una secreción hepática formada por grandes cantidades de sales biliares y de lecitina, extraordinariamente importantes para la emulsión de las grasas. Su mecanismo es el siguiente, las regiones polares de las sales biliares y la lecitina son muy solubles en agua, mientras que la mayor parte de las regiones restantes de sus moléculas son muy solubles en grasa, por lo tanto, las porciones liposolubles se disuelven en la capa superficial del glóbulo mientras que las porciones polares, se proyectan hacia afuera provocando una disminución de la tensión interfacial de la grasa, por lo que al agitarse pueden romperse fácilmente en numerosas partículas diminutas, facilitando la digestión de estas partículas grasas por las enzimas digestivas, debido a que las lipasas son sustancias hidrosolubles que sólo pueden atacar a los glóbulos de grasa en sus superficies (Setchell et al. 2012).

La enzima más importante para la digestión de los triglicéridos es la lipasa pancreática, presente en grandes cantidades en el jugo pancreático, digiriendo en pocos minutos todos los triglicéridos que encuentre. También los enterocitos del intestino delgado contienen una mínima cantidad de lipasa intestinal, cuya función no es muy significativa. La mayor parte de los triglicéridos son degradados por la lipasa pancreática en ácidos grasos libre y 2-monoglicéridos. La hidrólisis de los triglicéridos es un proceso muy reversible, por tanto, la acumulación de monoglicéridos y de ácidos grasos libres en la vecindad de las grasas en proceso de digestión puede bloquear rápidamente este proceso (Guyton y Hall 2011). Las sales biliares juegan un papel muy importante, puesto que separan a los monoglicéridos y a los ácidos grasos libres de la vecindad de los glóbulos de grasa que están siendo digeridos. Las sales biliares, forman micelas, que son glóbulos esféricos cilíndricos de 3 a 6 nanómetros de diámetro y formados por 20 a 40 moléculas de sales biliares. En la micela se produce la agregación de los núcleos esteroles de las moléculas de sales biliares con las grasas digeridas, formando un pequeño glóbulo de grasa en el centro, mientras que los grupos polares de las sales biliares se proyectan hacia fuera, estos grupos polares que tienen carga negativa, permiten que la totalidad de la micela se disuelva en el agua de los líquidos digestivos y que permanezca en solución

estable a pesar de su gran tamaño. Durante la digestión de los triglicéridos, las porciones grasas de los monoglicéridos y ácidos grasos libres, se disuelven en la porción grasa central de la micela, disminuyendo con esto, la concentración de los productos finales de la digestión que se encuentran en la vecindad de los glóbulos que están siendo digeridos y el proceso digestivo puede seguir sin interrupción. Estas micelas también actúan como medio de transporte de los monoglicéridos y de los ácidos grasos libres, a través de los ribetes en cepillo de las células epiteliales intestinales. Cuando abandonan a estas sustancias en el ribete en cepillo, las micelas vuelven de nuevo hacia el quimo para ser utilizadas otra vez en este proceso de transbordo (Setchell et al. 2012).

En el caso de los ésteres de colesterol y los fosfolípidos provenientes de la dieta, la digestión se lleva a cabo por otras dos lipasas de la secreción pancreática que actúan liberando a los ácidos grasos, la colesterol éster hidrolasa y la fosfolipasa A<sub>2</sub>. Las micelas de las sales biliares desempeñan el mismo papel en el transporte del colesterol libre y el resto de las porciones de las moléculas digeridas de fosfolípidos. Esta función de las micelas es esencial para la absorción del colesterol, de forma que, sin ellas, esta absorción sería prácticamente nula (Guyton y Hall 2011).

### **Absorción de los lípidos**

Una vez digeridos, los monoglicéridos y los ácidos grasos son transportados hacia la superficie de las microvellosidades del ribete en cepillo, penetrando en las hendiduras existentes entre las microvellosidades que se mueven, en este lugar, se difunden a través de la membrana celular del enterocito hacia su interior, lo que resulta posible gracias a que estos lípidos son tan solubles en las membranas enterocitarias como en las micelas (Iqbal y Hussain 2009).

Luego de penetrar en el enterocito, los ácidos grasos y los monoglicéridos son captados por el retículo endoplásmico liso, donde son recombinados para formar nuevos triglicéridos. Enseguida los triglicéridos reconstruidos se agregan primero en el retículo endoplásmico y después en el aparato de Golgi, formando glóbulos que contienen colesterol y fosfolípidos absorbidos y pequeñas cantidades de colesterol y fosfolípidos de nueva síntesis. Además, el retículo endoplásmico sintetiza también pequeñas cantidades de varias apoproteínas que cubren parte de la superficie de estos glóbulos;

estos glóbulos son llamados quilomicrones. De esta manera, el aparato de Golgi los libera y excreta por exocitosis celular hacia los espacios basolaterales alrededor de la célula. Desde las superficies basolaterales de los enterocitos, los quilomicrones siguen su camino hacia los canales linfáticos centrales de las vellosidades, desde son propulsados junto con la linfa por la bomba linfática que los dirige hacia el conducto torácico, desde donde pasan a las grandes venas del cuello (Mansbach y Gorelick 2007).

Los triglicéridos y diglicéridos no digeridos son muy solubles en la membrana lipídica de los enterocitos, sin embargo, sólo se absorben pequeñas cantidades, ya que las micelas de sales biliares no disuelven a ninguno de estos compuestos, por lo que no los transportan hacia la membrana enterocitaria. Por otro lado, pequeñas cantidades de ácidos grasos de cadena media y corta, en lugar de convertirse en triglicéridos y pasar a la linfa, se absorben directamente hacia la sangre portal. Esto se debe a que son más hidrosolubles y por lo general no son convertidos en triglicéridos por el retículo endoplásmico. Esto permite que estos ácidos grasos se difundan directamente desde las células epiteliales a la sangre capilar de las vellosidades (Guyton y Hall 2011).

### **Metabolismo de los lípidos**

La mayor parte de los quilomicrones de la sangre circulante, desaparecen mientras pasan a través de los capilares del tejido adiposo y del hígado, debido a que estos contienen grandes cantidades de una enzima llamada lipasa de lipoproteínas, que actúa en el endotelio capilar, hidrolizando los triglicéridos de los quilomicrones que se pegan a la pared endotelial, liberando ácidos grasos y glicerol. Los ácidos grasos, al ser muy miscibles con las membranas celulares, difunden inmediatamente al interior de las células grasas del tejido adiposo y a las células hepáticas. Una vez dentro de estas células, los ácidos grasos vuelven a formar triglicéridos, aportando las células glicerol nuevo. La lipasa también hidroliza los fosfolípidos, liberando ácidos grasos que se almacenan en las células de la misma forma. De esta manera se extraen la mayor parte de los quilomicrones de la sangre, después es principalmente el hígado el que capta el resto. Cuando la grasa que se ha almacenado en el tejido adiposo se va a utilizar en otro lugar del cuerpo, principalmente para proporcionar energía, primero se debe transportar a los otros tejidos, y lo hace en forma de ácido graso libre. Al dejar las células grasas, los

ácidos grasos se ionizan fuertemente en el plasma y se combinan con moléculas de albúmina de las proteínas plasmáticas (Guyton y Hall 2011).

### *Lipoproteínas*

Después de haber extraído todos los quilomicrones de la sangre, más del 95% de todos los lípidos del plasma están en forma de lipoproteínas, que son pequeñas partículas formadas por triglicéridos, colesterol, fosfolípidos y proteínas. Existen cuatro tipos principales de lipoproteínas: lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), que contienen concentraciones elevadas de triglicéridos y concentraciones moderadas de colesterol y fosfolípidos; lipoproteínas de densidad intermedia (IDL), son lipoproteínas de muy baja densidad, de las que se ha extraído una gran parte de los triglicéridos, aumentando las concentraciones de colesterol y fosfolípidos; lipoproteínas de baja densidad (LDL), que son lipoproteínas de densidad intermedia de las que se han extraído todos los triglicéridos, quedando una concentración alta de colesterol y moderadamente alta de fosfolípidos; lipoproteínas de alta densidad (HDL), contienen una alta concentración de proteínas (50%) y concentraciones menores de colesterol y fosfolípidos (Eisenberg y Levy 1975). La mayor parte de las lipoproteínas se forman en el hígado, y su función básica es transportar los componentes lipídicos de la sangre. Las lipoproteínas de muy baja densidad transportan triglicéridos sintetizados en el hígado principalmente al tejido adiposo, mientras que las otras lipoproteínas participan en los diferentes estadios del transporte de los fosfolípidos y del colesterol desde el hígado a los tejidos periféricos, o desde la periferia al hígado (Fredrickson et al. 1967).

El uso de las grasas por el organismo para obtener energía es tan importante como el uso de los hidratos de carbono. Además muchos de los hidratos de carbono ingeridos en cada comida se convierten en triglicéridos, después se almacenan y, por último, se utilizan en forma de ácidos grasos liberados de los triglicéridos para obtener energía. El primer paso en el uso de los triglicéridos para obtener energía es su hidrólisis en ácidos grasos y glicerol, después los ácidos grasos y el glicerol se transportan a los tejidos activos, donde se oxidarán para dar energía. Casi todas las células, excepto por las del tejido cerebral, pueden usar los ácidos grasos, para obtener energía. El glicerol, al entrar en el tejido activo, pasa de inmediato, por la acción de las enzimas intracelulares, a glicerol 3-

fosfato, que entra en la vía glucolítica, y se utiliza así para obtener energía. La degradación y oxidación de los ácidos grasos se produce sólo en la mitocondria, el ácido graso se degrada en la mitocondria mediante la liberación de segmentos de dos carbonos en forma de acetil-CoA, estas moléculas de acetil-CoA entran inmediatamente al ciclo del ácido cítrico. De esta manera, tras la degradación de los ácidos grasos a acetil-CoA, su rotura final es igual que la del acetil-CoA de la glucosa, después el hidrógeno se oxida mediante el mismo sistema oxidativo quimiosmótico de la mitocondria que se usa en la oxidación de los hidratos de carbono, liberando grandes cantidades de ATP (Guyton y Hall 2011).

#### *Síntesis de triglicéridos a partir de hidratos de carbono*

Siempre que entra en el cuerpo una cantidad de hidratos de carbono mayor que la que se puede usar de inmediato para obtener energía o almacenarse en forma de glucógeno, el exceso se convierte rápidamente en triglicéridos y se almacenan de esta forma en el tejido adiposo. En los seres humanos, la mayor parte de la síntesis de triglicéridos se produce en el hígado, pero también el tejido adiposo sintetiza cantidades mínimas. El primer paso para la síntesis de triglicéridos a partir de carbohidratos, es la conversión de los hidratos de carbono en acetil-CoA, enseguida la síntesis de ácidos grasos a partir de acetil-CoA se lleva a cabo, utilizando malonil CoA y NADPH como principales intermediarios en el proceso de polimerización. Una vez que las cadenas de ácidos grasos han crecido hasta contener de 14 a 18 átomos de carbono, se unen al glicerol para formar triglicéridos. La síntesis de grasa a partir de hidratos de carbono es importante debido a que la capacidad de las diferentes células del cuerpo para almacenar carbohidratos en forma de glucógeno es en general pequeña, por lo que la síntesis de grasa proporciona un medio por el que la energía del exceso de hidratos de carbono se puede almacenar para un uso superior. Además, cuando se dispone de un exceso de hidratos de carbono, la síntesis de ácidos grasos es más rápida que su degradación (Guyton y Hall 2011).

### *Colesterol*

El colesterol que se absorbe del tubo digestivo a través de la dieta es llamado colesterol exógeno, mientras que el colesterol formado por las células del cuerpo, es llamado colesterol endógeno, el cual es mayor. Casi todo el colesterol endógeno que circula en las lipoproteínas del plasma se forma en el hígado, pero las demás células del cuerpo forman al menos algo de colesterol. Su estructura básica es un núcleo de esterol, a su vez, este núcleo puede modificarse por medio de varias cadenas laterales para formar, colesterol, ácido cólico, que es la base de los ácidos biliares, y muchas hormonas esteroideas importantes secretadas por la corteza suprarrenal, los ovarios y los testículos. Existen varios factores que pueden afectar la concentración plasmática de colesterol, el primero es un aumento del colesterol ingerido todos los días. Sin embargo, cuando se ingiere colesterol, la concentración aumentada de éste, inhibe la enzima más importante para su síntesis endógena, la reductasa de la 3-hidroxi-3-metilglutaril CoA, proporcionando un sistema de control por retroacción intrínseca que evite el aumento excesivo de la concentración plasmática de colesterol. Otro factor puede ser, el consumo de una dieta alta en grasa saturada, debido a un aumento del depósito de grasa en el hígado, que proporciona mayores cantidades de acetil-CoA en las células hepáticas para la producción de colesterol. Por otro lado, la ingestión de grasa rica en ácidos grasos muy insaturados disminuye la concentración sanguínea de colesterol en una cantidad de leve a moderada (Hui et al. 2008). El colesterol es de vital importancia para la formación de estructuras especializadas en todas las células del cuerpo, principalmente para la formación de las membranas celulares. Una cantidad pequeña de colesterol la utilizan las glándulas suprarrenales para formar hormonas cortico-suprarrenales, los ovarios para formar progesterona y estrógeno, y los testículos para formar testosterona (Guyton y Hall 2011).

### **Modelos animales de análisis *in vivo***

Los fisiólogos franceses, François Magendie (1783-1855) y Claude Bernard (1813-1878), establecieron los fundamentos para estudiar las funciones corporales por medio de la experimentación animal (Bernard 1983). Claude Bernard estipulaba que si toda la materia viva sigue las mismas leyes fisiológicas, los experimentos en animales han de

dar lugar a verdades aplicables a los humanos (LaFollette y Shanks 1994). En el siglo XIX, inició el ascenso de la experimentación animal, gracias al descubrimiento de la anestesia (1842/1847) y las técnicas quirúrgicas, también surgieron las primeras regulaciones en la experimentación con animales, como la ley contra la crueldad con los animales en el Reino Unido (Orlans 1993). La mayoría de los países, cuentan con normas sobre la experimentación animal, como es la directiva europea. Las cuales, definen la composición y funciones de los comités éticos de experimentación animal (CEEAA), que contemplan el registro en el uso de animales y su cuidado, la tipología y evaluación de proyectos, así como los principios que debe cumplir la experimentación, las 3 erres: reemplazo, reducción y refinamiento (National Research Council 2010).

La experimentación animal ha representado uno de los instrumentos fundamentales para el conocimiento de la fisiología médica y el desarrollo de intervenciones médicas. Ejecutada e interpretada correctamente, desempeña un papel útil, sobretodo si se integra en líneas de investigación clínicamente relevantes (Wall y Shani 2008). Diversas instituciones han resaltado la importancia de la investigación en animales para la resolución de problemas médicos. Ejemplos de estos beneficios son estudios con la insulina (perros), las transfusiones (varios animales), vacuna contra la polio (primates no humanos), cirugías cardíacas (perros, cerdos), etc. En fin, múltiples especies animales han contribuido al bienestar humano (Rowan 1997). Se ha presentado un incremento del 296% entre el 2002 y 2012, en el número de animales utilizados para estudios biológicos y el aumento es generalizado para el estudio de distintas enfermedades. Especialmente, se ha presentado un aumento en el uso de roedores, en su mayoría ratones, y peces. El aumento en los roedores, se explica por la generación de ratones transgénicos (Pons et al. 2014).

Un modelo es una representación o descripción que muestra la estructura o función de un sistema o concepto, sobre el cual no se puede intervenir directamente. Un modelo animal es un organismo vivo en el que se puede estudiar un fenómeno de interés y este tiene semejanzas, con el fenómeno presente en el animal diana (Wall y Shani 2008).

En los modelos animales, generalmente en mamíferos u otros vertebrados, es posible estudiar fenómenos biológicos y enfermedades de una forma que no es realizable en los humanos. Entre los modelos animales con mayor éxito, destacan las afecciones

endocrinas, el desarrollo de vacunas y el tratamiento de múltiples enfermedades infecciosas (National Research Council 2010).

Los modelos de animales han sido ampliamente utilizados en estudios de investigación para simular y considerar la anatomía y fisiología del cuerpo humano como análogos. En este tipo de estudios, es muy importante considerar varios criterios, como lo son, la disponibilidad del número de animales, la facilidad de manipulación, que sean adaptables con los recursos disponibles y que la esperanza de vida de los animales sea suficiente para la duración del estudio.

Animales omnívoros como la rata y el cerdo se han podido utilizar para simular el funcionamiento gastrointestinal y las funciones hepáticas de los seres humanos. Sin embargo, la rata de laboratorio, es más utilizada, debido a su pequeño tamaño y fácil manipulación. Haciendo una comparación entre las diferencias y similitudes entre los tractos gastrointestinales del ser humano y la rata; en la faringe humana existe un solo tubo, el cual es el pasadizo entre los alimentos y el aire, mientras que en la rata, la faringe se divide en dos compartimentos, uno para la respiración y el otro para fines de alimentación. El estómago humano solo contiene una cámara donde los alimentos se mezclan con el ácido y las enzimas; mientras que en el estómago de la rata, aunque es una sola cámara, esta dividida en dos zonas, en la primera se realiza la digestión bacteriana, mientras que en la segunda, las glándulas estomacales segregan enzimas y ácido, en el caso del estómago del ser humano, la digestión bacteriana esta ausente (DeSesso y Jacobson 2001).

El intestino delgado del ser humano tiene tres regiones funcionalmente diferentes, el duodeno, yeyuno e íleon, donde la mayoría de la digestión y absorción de nutrientes se lleva a cabo en el duodeno. Mientras que en el intestino de la rata la absorción de nutrientes se lleva a cabo en el duodeno y yeyuno. El yeyuno de la rata es proporcionalmente más largo, representando un 90% de la longitud del intestino, mientras que en los seres humanos, representa el 38%. El tiempo de tránsito de los alimentos a través del intestino delgado en las ratas es más lento que en los seres humanos. A pesar de que el intestino humano es 5.5 veces más largo que el de la rata, el tiempo de tránsito de los alimentos por el intestino delgado de los humanos y la rata es similar, de 3-4 horas. El área de superficie del intestino delgado del ser humano es 200



veces mayor que el de la rata. En cuestión de la bilis, almacenada y segregada por la vesícula biliar en los seres humanos, en las ratas se segrega el doble de bilis dentro del duodeno por kilogramo de peso del animal por día. El intestino grueso del ser humano se divide en ciego, colon ascendente, colon transversal, colon descendente, colon sigmoideo, recto y el ano. En el caso de la rata, el colon sigmoideo esta ausente, el ciego, que representa hasta un 26%, es el responsable de la mayor parte de la digestión microbiana. Por el contrario, en el ser humano, el ciego representa sólo el 5%. Los tipos de microorganismos presentes naturalmente en el sistema digestivo del ser humano y la rata pueden ser diferentes (DeSesso y Jacobson 2001).

Es fundamental hacer hincapié que para realizar este tipo de estudios de experimentación animal, es necesario garantizar un adecuado bienestar animal, el cual se logra al cumplirse aquellas condiciones en las que se satisfacen las necesidades físicas y de comportamiento de un animal. Se deben garantizar las condiciones adecuadas de alojamiento (temperatura, humedad, iluminación, ruido), de nutrición (acceso a la comida y agua) y de sanidad (higiene, prevención y control de enfermedades). Una estrategia pertinente, es cumplir la regla de las tres erres: reemplazo, reducción y refinamiento. El “reemplazo” implica sustituir el uso de los animales por medios alternativos, como modelos matemáticos, simuladores computarizados o sistemas biológicos *in vitro*. En caso de no existir otros sistemas que puedan reemplazar el uso de animales vivos, debería aplicarse la “reducción” en el número de animales utilizados, siempre y cuando permita llegar a resultados con validez científica. Por último, el “refinamiento” consiste en la obligación de estipular los métodos para determinar el dolor o el estrés en los animales, el uso de métodos no invasivos, y en caso de ser necesario, el uso de anestésicos, analgésicos y tranquilizantes adecuados, o la aplicación de eutanasia anticipada en los animales involucrados en los experimentos. Es importante que el costo y la conveniencia no se antepongan a estos tres principios (Jar 2014). Por lo tanto, en base a la información científica revisada, se elaboró un cereal extrudido instantáneo con ingredientes funcionales como la linaza y el amaranto, alto en fibra, para ser evaluado mediante un modelo de análisis *in vivo* y conocer su impacto sobre los niveles de glucosa y lípidos en sangre, además de analizar sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales.

## JUSTIFICACIÓN

El interés actual se ubica en la relación entre la alimentación y las enfermedades crónico-degenerativas; los consumidores están cada vez más conscientes de su autocuidado y buscan en el mercado aquellos productos que contribuyan a su salud y bienestar. Siguiendo esta tendencia, el consumidor está recibiendo abundante información acerca de las propiedades saludables de los alimentos, en especial de aquellos alimentos que ejercen una acción benéfica sobre algunos procesos fisiológicos y/o reducen el riesgo de padecer una enfermedad. Estos alimentos, que promueven la salud, han sido denominados genéricamente alimentos funcionales (Sloan 1999). Sin embargo muchos de estos alimentos que prometen tener efectos benéficos en la salud debido a sus ingredientes bioactivos no han sido analizados debidamente bajo las condiciones de modelos como los análisis *in vivo*, que permitan comprobar y explicar mejor los efectos que dicen tener.

Mediante el proceso de extrusión-cocción es posible elaborar este tipo de alimentos incluyendo una gran variedad de ingredientes, además son de fácil consumo y con buena aceptación para el consumidor, ejemplo de este tipo de productos son los cereales extrudidos. Es por esto, que en este estudio fueron evaluadas las propiedades funcionales de un cereal extrudido instantáneo alto en fibra hecho a base de linaza y amaranto mediante un modelo *in vivo* que permitió explicar sus efectos sobre los niveles de glucosa y lípidos en sangre. La linaza y el amaranto contienen ingredientes funcionales como la fibra soluble, que ha demostrado reducir los niveles de glucosa y lípidos en sangre (Ruiz 1991) y componentes como los ácidos grasos omega 3 y omega 6 que sugieren poder tener un efecto hipolipemiante (McDonald 1998; Plate y Arêas 2002). Sin embargo, estos efectos están relacionados con la proporción adecuada de estos ingredientes, así como el efecto que ejerce el proceso de extrusión que podría contribuir a una modificación microestructural que puede incrementar el contenido de fibra soluble, además de relacionarse con atributos sensoriales de aceptabilidad del producto. Por ello, es importante evaluar y determinar la combinación óptima de los ingredientes para la obtención de un cereal extrudido de calidad con atributos sensoriales aceptables y con un impacto biológico.

## **HIPÓTESIS**

La inclusión de ingredientes funcionales en un cereal extrudido instantáneo le confieren un efecto modulador en la absorción de carbohidratos y lípidos que es posible evidenciar mediante un modelo *in vivo* que refleja un efecto hipoglucemiante e hipolipemiante.

## **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un cereal extrudido alto en fibra y evaluar sus propiedades funcionales, en la absorción de glucosa y lípidos mediante un modelo de análisis *in vivo*.

### **Objetivos Particulares**

- Optimizar la formulación de la mezcla de ingredientes y las condiciones de extrusión para la obtención de un cereal extrudido hecho a base de linaza, amaranto y sémola de maíz.
- Evaluar los cereales extrudidos de los diferentes tratamientos mediante el análisis de las propiedades físicas, químicas y sensoriales.
- Evaluar la asimilación y absorción de glucosa de un cereal extrudido alto en fibra, mediante un modelo de análisis *in vivo*.
- Evaluar la absorción de lípidos de un cereal extrudido alto en fibra mediante un modelo de análisis *in vivo*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Materia prima**

Las materias primas que se utilizaron para la realización de este estudio fueron: amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), linaza (*Linum usitatissimum*), sémola de maíz (grits No. 4) e ingredientes menores como sucralosa, cacao y canela que se obtuvieron de un almacén local de distribución de semillas (Monterrey, Nuevo León, México). Las materias primas se colocaron en bolsas de polietileno y se almacenaron a temperatura ambiente hasta su preparación y uso. El amaranto y la linaza se molieron en un molino de martillos (Weber Bros. Metal Works, Chicago, EE. UU.), equipado con una abertura de malla separada de 0.05 mm. Todos los materiales de partida se analizaron en un análisis proximal de acuerdo con el análisis de métodos oficiales (AOAC 1998).

### **Formulación de las mezclas**

Diferentes mezclas de amaranto y linaza fueron elaboradas bajo un diseño completamente al azar de dos factores. Los factores a manipular fueron la linaza con niveles del 10 y 15% y el amaranto con niveles de 30, 40% y 50% (Tabla 1). La combinación de cada uno de los factores generó una estructura de tratamientos en un arreglo factorial completo de 2X3:  $Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + \Theta_{ij} + e_{ijk}$ .

Estos porcentajes se tomaron de un peso total de 4 kg. Sin embargo, fue necesario alcanzar otras condiciones que garantizarán un producto con características fisicoquímicas y sensoriales aceptables como la obtención de porcentajes de lípidos y fibra menores a 5.6 y 2.5% respectivamente, de acuerdo a lo que reporta la literatura (Harper 1981; Lusas y Riaz 1999). Esto se logró mediante la adición de sémola de maíz y otros ingredientes menores (sucralosa, cocoa y canela), a los 4 kg ya preparados.

**Tabla 1.** Combinación experimental de las variables de proceso

<b>Tratamiento</b>	<b>Factor A Linaza</b>	<b>Factor B Amaranto</b>
Mezcla 1	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>
Mezcla 2	a <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
Mezcla 3	a <sub>1</sub>	b <sub>3</sub>
Mezcla 4	a <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>
Mezcla 5	a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>
Mezcla 6	a <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>

Al final la combinación de estos factores (amaranto y linaza) y la adición de la sémola de maíz, dio como resultado seis mezclas diferentes (Tabla 2): Mezcla 1 (8.6% linaza, 25.9% amaranto y 65.5% sémola de maíz), Mezcla 2 (7.7% linaza, 30.7% amaranto y 61.6 sémola de maíz), Mezcla 3 (6.9% linaza, 34.7% amaranto y 58.4% sémola de maíz), Mezcla 4 (9.8% linaza, 19.6% amaranto y 70.6% sémola de maíz), Mezcla 5 (9% linaza, 24% amaranto y 67% sémola de maíz) y Mezcla 6 (8.3% linaza, 27.7% amaranto y 64% sémola de maíz). Los ingredientes de cada uno de los seis tratamientos se mezclaron y se distribuyeron uniformemente en un mezclador industrial (Bathammex, Ciudad de México, México) durante cinco minutos.

**Tabla 2.** Proporción de ingredientes de los diferentes tipos de mezclas

<b>Tratamiento</b>	<b>Linaza (%)</b>	<b>Amaranto (%)</b>	<b>Sémola de maíz (%)</b>
Mezcla 1	8.6	25.9	65.5
Mezcla 2	7.7	30.7	61.6
Mezcla 3	6.9	34.7	58.4
Mezcla 4	9.8	19.6	70.6
Mezcla 5	9.0	24	67
Mezcla 6	8.3	27.7	64

### Proceso de extrusión

Para el proceso de extrusión, fue utilizado un extrusor de doble tornillo (BCTM-30, Bühler, AG, Uzwil, Switzerland), con 600 mm de largo, una relación de longitud de diámetro (L/D) de 20:1 y una abertura del dado de salida de 4 mm, la configuración del tornillo se seleccionó específicamente para crear altos niveles de cizallamiento. Las mezclas fueron alimentadas al extrusor a una velocidad de alimentación volumétrica de  $7.5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  y se procesaron a una velocidad de 272 rpm. El contenido de humedad fue de 0.22 kg de agua/kg de materia seca y se ajustó dentro del extrusor; la temperatura que se utilizó a lo largo del extrusor se fijo en  $150^\circ\text{C}$  para todos los tratamientos (Figura 3). Todos estos parámetros se determinaron en base a pruebas preliminares. Al final los extrudidos obtenidos de cada mezcla fueron secados a una temperatura de  $120^\circ\text{C}$  durante 15 min en un horno de convección de gas (Electrolux 10 GN/1, Estocolmo, Suecia), con una velocidad de aire de flujo cruzado de  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  hasta que los extrudidos alcanzaron un rango de nivel de humedad de  $0.017 \text{ kg H}_2\text{O}\cdot\text{kgss}^{-1}$  a  $0.031 \text{ kg H}_2\text{O}\cdot\text{kgss}^{-1}$ . 6 kg de cada tratamiento fueron obtenidos, se colocaron en bolsas de polietileno y fueron almacenados a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ) hasta su evaluación.



**Figura 3.** Condiciones del proceso de extrusión para el desarrollo del cereal extrudido

## **Métodos**

### **Caracterización de la materia prima y de los productos extrudidos**

Se realizó un análisis de composición proximal a la materia prima, los cereales extrudidos y las dietas del análisis *in vivo*; para determinar humedad, proteína, grasa, fibra cruda y cenizas de acuerdo con los métodos 950.02, 960.52, 920.39, 962.09 y 923.03, respectivamente de acuerdo con el análisis de métodos oficiales (AOAC 1998). La masa de carbohidratos se calculó como la diferencia entre estos valores y la masa total. El análisis se llevó a cabo por triplicado para cada tratamiento, y los resultados se expresan en g/100 g.

Para la realización de estos análisis se utilizaron los siguientes reactivos: ácido clorhídrico 37.2%, ácido sulfúrico 97.9%, hexano 99.8%, etanol 99.9% y ácido bórico 99.5%, todos fueron grado analítico y se obtuvieron de J.T. Baker (Ciudad de México, México). Se obtuvo hidróxido de sodio grado analítico (97.0%) de Sigma-Aldrich (St. Louis MO, EE. UU.). La mezcla reactiva de selenio se obtuvo de Merck (Darmstadt, Alemania).

### **Fibra dietética, insoluble y soluble**

La fibra dietética, insoluble y soluble en las mezclas sin extrudir, los cereales extrudidos y las dietas para el análisis *in vivo*, se determinaron con un kit para fibra dietética total (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.), de acuerdo con el método enzimático 991.43 (AOAC 1998). El análisis se llevó a cabo por duplicado para cada tratamiento y los resultados se expresaron en g/100g.

### **Densidad aparente**

La densidad aparente se determinó de acuerdo con lo mencionado por Jin et al. (1994). Se utilizó una probeta de 10 ml previamente pesada en una balanza analítica (marca Ohaus, modelo Explorer, EE. UU.), enseguida se llenó con la muestra del extrudido previamente molida y tamizada por una malla No. 40 (0.42 mm), en un tamizador (marca Tyler industrial products, modelo RX-24, EE. UU.). Después la probeta llena de la muestra se pesó en una balanza analítica (marca Ohaus, modelo Explorer, EE. UU.) y



se restó el peso de la probeta, para conocer el peso de la muestra contenida en la probeta. Para conocer el valor de densidad aparente se aplicó la siguiente fórmula (1):

$$DA = \frac{PE}{VE} \quad (1)$$

Donde:

DA= Densidad aparente (kg/L)

PE = Peso del extrudido (kg)

VE =Volumen del extrudido-probeta (L)

### **Índice de expansión**

Se realizó de acuerdo a Ryu et al. (1993). Para esta determinación se midió el diámetro de los extrudidos de cada uno de los tratamientos con un Vernier (Scala INCH, de 12 cm). Las mediciones se realizaron a 60 extrudidos de cada uno de los tratamientos. Los resultados obtenidos de esta medición se dividieron entre el diámetro de la abertura del dado (4 mm), y fueron reportados en milímetros (mm).

### **Índices de absorción y de solubilidad de agua**

El índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA) se determinaron por triplicado siguiendo los procedimientos descritos por Anderson et al. (1969). Los métodos miden la cantidad de agua incorporada en la harina y los sólidos solubles que se disuelven en agua a 30°C. Las muestras se pesaron (2.5 g) en tubos de plástico y se mezclaron con 30 ml de agua destilada, enseguida se agitaron manualmente, las suspensiones se centrifugaron durante 10 min a 3200 g (Thermo IEC modelo CL3-R, EE. UU.), y el sobrenadante fue decantado en cápsulas de porcelana previamente pesadas. El gel que quedaba en los tubos después de decantar el sobrenadante fue pesado. La relación entre sólidos formadores de geles y sólidos solubles se midió como gramos de agua por gramo de harina. El IAA se calculó como un porcentaje del peso restante del gel en comparación con el peso previamente secado de los cereales extrudidos. El ISA se calculó como un porcentaje del peso del sobrenadante seco en comparación con el peso previamente secado de los cereales extrudidos.

### **Análisis de color**

El parámetro de color fue medido en los diferentes cereales extrudidos, por reflectancia, mediante el sistema “L”, “a”, “b”, utilizando un colorímetro Konica Minolta CR-400/410 (Minolta Co., Osaka, Japón), el cual fue calibrado con un blanco de referencia (X= 94.9, Y= 0.3185, Z= 0.3124). Se registraron los valores de L (luminosidad), a (-verde, +rojo) y b (- azul, +amarillo) para los diferentes tratamientos y se hicieron treinta mediciones de cada uno (Ruiz-Gutiérrez et al. 2012).

### **Cinéticas de absorción en leche para los cereales extrudidos**

Las cinéticas de absorción en leche fueron realizadas de acuerdo al método descrito por Machado et al. (1999). Para esta prueba se tomó el peso inicial de los cereales extrudidos, enseguida se sumergieron en leche a 4°C y se registró el peso ganado por cada cereal a los 2, 5, 10 y 20 min. Con los datos obtenidos fueron realizadas las curvas de absorción de leche en los extrudidos.

### **Medición de textura: dureza y crujibilidad**

La evaluación de la dureza y crujibilidad de los extrudidos se realizó de acuerdo con el método descrito por Ding et al. (2005), y se llevó a cabo utilizando un analizador de textura TA.XT (Texture Technologies Corporation, Scarsdale, Nueva York/Stable Micro Systems, Haslemere, Surrey, Reino Unido) configurado con un punzón de 2 mm a una velocidad del punzón de 5 mm/s y a una distancia de 15 mm. Veinticuatro muestras extrudidas se tomaron aleatoriamente de cada tratamiento y se analizaron. Una curva de tiempo de fuerza fue registrada y analizada por el programa Texture Exponent 32 (Surrey, Reino Unido) para calcular la fuerza máxima (N) y determinar la dureza y el área bajo la curva (N/mm) para determinar la crujibilidad.

### **Propiedades de viscosidad en los cereales extrudidos**

El perfil de viscosidad amilográfica fue determinado de acuerdo al método descrito por Sánchez-Madrugal et al. (2013), con algunas modificaciones, usando un analizador rápido de viscosidad (RVA SUPER 4, Newport Scientific, Sydney, Australia). Las suspensiones con las muestras de harina se prepararon pesando 4 g de los diferentes

cereales extrudidos molidos y secos ( $50 \pm 2^\circ\text{C}$ , 12 h) con un contenido de humedad de 7.5 a 8.5% y un tamaño de partícula de 0.25 mm, en un contenedor RVA y ajustando individualmente cada muestra a un peso total de 28 g usando agua destilada. Las paletas giratorias se mantuvieron a  $50^\circ\text{C}$  durante 1 min para estabilizar la temperatura y asegurar una dispersión uniforme y luego se calentó a  $92^\circ\text{C}$  a una velocidad de  $5.6^\circ\text{C}/\text{min}$ , que se mantuvo constante durante 5 min. La dispersión se enfrió después a  $50^\circ\text{C}$  a la misma velocidad y se mantuvo a  $50^\circ\text{C}$  durante 1 min. Se registró la viscosidad máxima ( $V_{\text{max}}$ ) a  $92^\circ\text{C}$ , la viscosidad mínima ( $V_{\text{min}}$  o la viscosidad más baja al final del período constante de calentamiento a  $92^\circ\text{C}$ ) y la viscosidad final ( $V_{\text{fin}}$ , alcanzada durante el enfriamiento o la retención  $50^\circ\text{C}$ ). La viscosidad de retroceso total o viscosidad de retrogradación (viscosidad final menos viscosidad mínima) se calculó a partir de los valores de estos parámetros. La viscosidad con RVA se obtuvo en unidades de RVU (1 RVU = 10 centipoises). El análisis fue realizado a cada tratamiento por duplicado.

### **Microscopía electrónica de barrido**

Este análisis fue realizado de acuerdo con el método descrito por Sánchez-Madrigal et al. (2013). Las harinas de cada cereal extrudido con un tamaño de partícula  $<0.15$  mm y un contenido de humedad del 1% fueron montadas en cilindros conductores con cinta adhesiva de doble cara y recubiertos con una capa fina de oro, en alto vacío utilizando un evaporador de vacío Denton (Desk II, Moorestown, NJ, EE. UU), hasta alcanzar una presión de  $7.031 \times 10^{-2} \text{ kg cm}^{-2}$ . Las muestras se examinaron utilizando un microscopio electrónico de barrido (JSM-5800LV, JEOL, Akishima, Japón) equipado con un detector de electrones secundario a una velocidad de aceleración de 10 kV.

### **Evaluación sensorial**

Para evaluar la calidad y aceptación de los cereales extrudidos se realizó una evaluación sensorial mediante una prueba de grado de satisfacción por medio de una escala hedónica de cinco niveles, que incluye el descriptivo “muy malo” hasta el descriptivo “muy bueno”, la escala fue presentada de manera gráfica por medio de caritas que expresaban cada descriptivo (Figura 4). Esta prueba se realizó para evaluar tres atributos sensoriales: color, sabor y textura. También se evaluó el grado de preferencia mediante

una prueba de ordenamiento para conocer en que orden de preferencia catalogan los jueces a cada uno de los diferentes tratamientos y los resultados fueron analizados mediante una prueba de Friedman, éste análisis se llevó a cabo con muestras de cereal sin leche y de cereal con leche. Se realizaron tres pruebas sensoriales, la primera se realizó con los diferentes cereales extrudidos para elegir el extrudido con mejores resultados, que en este caso fue el cereal extrudido de la mezcla 5 (9% linaza, 24% amaranto y 67% sémola de maíz), para después evaluarlo con cereales extrudidos comerciales y con cereales extrudidos altos en fibra.

Para las evaluaciones participaron un total de 40 jueces consumidores y las pruebas se realizaron en el laboratorio de Evaluación Sensorial de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua. En cada evaluación se entregó a cada juez un formato de evaluación con las instrucciones indicadas para su realización (Anexo 1 y 2) y se buscó que las condiciones ambientales fueran adecuadas (buena iluminación, privacidad, mobiliario, etc.) (Figura 4).



**Figura 4.** Metodología para la evaluación sensorial

### **Formulación de las dietas para el análisis *in vivo***

Se realizó la formulación de las dietas para el análisis *in vivo* utilizando la composición proximal de los diferentes cereales extrudidos como base y añadiendo los ingredientes pertinentes para obtener dietas balanceadas según los requerimientos de la dieta control AIN-76, basada en caseína (Tabla 3), esto dio como resultado un total de seis tratamientos más la dieta control, que no contenía ningún cereal. A cada una de las dietas se les realizó un análisis de composición proximal y un análisis de fibra dietética insoluble y soluble (AOAC 1998).

**Tabla 3.** Dieta control AIN-76, basada en caseína

<b>Ingrediente</b>	<b>Porcentaje</b>
Caseína	20%
Almidón de maíz	50%
Azúcar	15.2%
Aceite de maíz	5%
Celulosa	5%
Minerales AIN-76	3.5%
Vitaminas AIN-76	1%
DL-Metionina	0.3%

**Fuente:** Amaya-Guerra 2003

### **Análisis *in vivo*, medición de glucosa y lípidos sanguíneos a través del tiempo**

El estudio *in vivo*, se llevó a cabo en el bioterio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Para este análisis se utilizaron ratas albinas de la raza Wistar, machos y con un mes de edad. Se formaron grupos de seis ratas para cada tratamiento y un grupo control, distribuidas de manera individual bajo condiciones ambientales controladas (12:12 h de luz/oscuridad, 23% de humedad relativa y temperatura ambiente de 21°C), proporcionando 25 g diarios de cada una de las dietas preparadas y agua *ad libitum* durante 45 días (Amaya-Guerra 2003). Los niveles de glucosa y lípidos (colesterol y triglicérido) sanguíneos, fueron analizados cada quince

días mediante una toma muestra por la vena de la cola de la rata (Bang et al. 2009). La glucosa fue analizada mediante un equipo Accu-Chek Active® (Roche Diagnostics GmbH, Mannheim, Alemania), y el colesterol y triglicéridos mediante un equipo Accutrend® Plus de la marca Roche (Roche Diagnostics GmbH, Mannheim, Alemania), utilizando tiras reactivas.

### **Métodos estadísticos**

Para el análisis estadístico de las pruebas realizadas a los cereales extrudidos, se realizó un análisis de varianza univariado ajustando un modelo que incluyó los efectos principales (linaza 10 y 15%; amaranto 30, 40% y 50%) y su interacción (Minitab 16 2010), cuando el efecto del factor interacción o el de los efectos principales resultó significativo ( $\alpha$  0.05), la comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey (Montgomery 2004).

Para el análisis *in vivo*, se evaluaron las diferencias significativas entre los diferentes tratamientos para los valores de glucosa, triglicéridos y colesterol a través del tiempo ( $\alpha$  0.05), por medio de un Modelo Lineal General (Minitab 16 2010) y la comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey (Montgomery 2004).

En la evaluación sensorial, se realizó un análisis de varianza ( $\alpha$  0.05) para el grado de satisfacción; la comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey (Minitab 16 2010). Para la prueba de ordenamiento se utilizó la prueba de Friedman para evaluar diferencias significativas y comparación de medias (Anzaldúa-Morales 1994).

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Caracterización de la materia prima

El análisis proximal de la materia prima muestra una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre los diferentes ingredientes que se utilizaron e indicó que contienen un alto valor nutricional (Tabla 4). La linaza presenta altos contenidos de proteína, grasa y fibra, y un contenido bajo de carbohidratos. Mientras que el amaranto presenta un mayor contenido de proteína que la sémola de maíz (Tabla 4). Estos valores concuerdan con los reportados en la literatura (Cervantes 2007; Morris 2007), donde se ha informado que la linaza es baja en carbohidratos (azúcares y almidones), alta en proteína de calidad, fibra y rica en ácidos grasos poliinsaturados, particularmente ácido alfa-linolénico (ALA o ALN), un ácido graso esencial omega-3 y ácido linoleico (AL), un aceite graso esencial omega-6 (Morris 2007). Por otro lado la literatura refiere que el amaranto contiene un buen equilibrio de aminoácidos, incluida la lisina, un aminoácido esencial que no se encuentra en la mayoría de los cereales (Pedersen et al. 1987).

La sémola de maíz fue la principal fuente de carbohidratos, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Composición proximal de la material prima\*

Componente (%)	Amaranto	Linaza	Sémola de maíz	EE
Humedad	1.4 <sup>c</sup>	5.3 <sup>b</sup>	11.3 <sup>a</sup>	0.01
Proteínas	17.4 <sup>b</sup>	22.4 <sup>a</sup>	8.7 <sup>c</sup>	0.2
Grasas	7.1 <sup>b</sup>	37.2 <sup>a</sup>	0.99 <sup>c</sup>	0.18
Fibra cruda	3.2 <sup>b</sup>	16.3 <sup>a</sup>	0.64 <sup>c</sup>	0.05
Cenizas	3.0 <sup>b</sup>	3.3 <sup>a</sup>	0.55 <sup>c</sup>	0.03
Carbohidratos	67.9	15.5	77.8	

\*Promedios  $\pm$  error estándar (EE). Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ). Carbohidratos fueron calculados por diferencia.

### **Caracterización de los cereales extrudidos**

La composición proximal de los cereales extrudidos se muestra en la Tabla 5. Las características químicas se vieron afectadas significativamente ( $P < 0.05$ ) por la interacción de las adiciones de amaranto y linaza en diversas proporciones. Los cereales extrudidos presentaron un alto porcentaje de proteína en comparación con otros cereales extrudidos comerciales, que normalmente contienen porcentajes entre 5 y 8% (Pérez-Lizaur et al. 2014). Esto se debe a la adición de ambos ingredientes, amaranto (17.4%) y linaza (22.4%) que contienen porcentajes altos de proteína (Tabla 4), lo que incrementa el porcentaje de este nutrimento en los cereales extrudidos. Además la adición de la proteína del amaranto puede asegurar un buen equilibrio de aminoácidos, debido a que contiene lisina, un aminoácido esencial que no se encuentra en la mayoría de los cereales (Pedersen et al. 1987), mientras que la proteína de la linaza es rica en arginina, ácido aspártico y ácido glutámico (Morris 2007). Contenidos de proteína similares fueron reportados en un estudio donde se obtuvieron extrudidos de amaranto (Guerra-Matías y Arêas 2005).

Es notable que los cereales extrudidos presentaron un contenido de fibra cruda deseable ( $< 2\%$ , Tabla 5), lo que permitió obtener productos con características fisicoquímicas y sensoriales aceptables para el consumidor sin un efecto negativo sobre el contenido calórico y de nutrientes, que podrían beneficiar especialmente a niños pequeños y mujeres embarazadas (Harper 1981). El contenido de grasa en los cereales extrudidos, presentó porcentajes por debajo del valor mínimo aceptable (5.6%) para obtener productos expandibles y de buena calidad (Lusas y Riaz 1999), siendo productos bajo en grasa también desde el punto de vista nutricional ( $< 5\%$ ).



**Tabla 5.** Composición proximal de los cereales extrudidos\*

Componente (%)	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	EE
Humedad	3.0 <sup>a</sup>	2.1 <sup>bc</sup>	2.4 <sup>ab</sup>	3.1 <sup>a</sup>	1.7 <sup>c</sup>	2.8 <sup>ab</sup>	0.13
Proteínas	12.2 <sup>ab</sup>	12.4 <sup>a</sup>	12.0 <sup>bc</sup>	12.3 <sup>ab</sup>	11.7 <sup>c</sup>	12.3 <sup>ab</sup>	0.06
Grasas	2.6 <sup>b</sup>	2.7 <sup>b</sup>	2.6 <sup>b</sup>	2.7 <sup>b</sup>	2.4 <sup>b</sup>	3.0 <sup>a</sup>	0.05
Fibra cruda	1.5 <sup>b</sup>	1.7 <sup>ab</sup>	1.9 <sup>a</sup>	1.7 <sup>ab</sup>	1.7 <sup>ab</sup>	1.9 <sup>a</sup>	0.02
Cenizas	1.6 <sup>c</sup>	1.7 <sup>ab</sup>	1.8 <sup>a</sup>	1.6 <sup>c</sup>	1.6 <sup>c</sup>	1.7 <sup>b</sup>	0.08
Carbohidratos	79.1 <sup>bc</sup>	79.4 <sup>b</sup>	79.3 <sup>bc</sup>	78.6 <sup>cd</sup>	80.9 <sup>a</sup>	78.3 <sup>d</sup>	0.11

\*Promedios  $\pm$  error estándar (EE). Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

### **Fibra dietética, insoluble y soluble de las mezclas y de los cereales extrudidos**

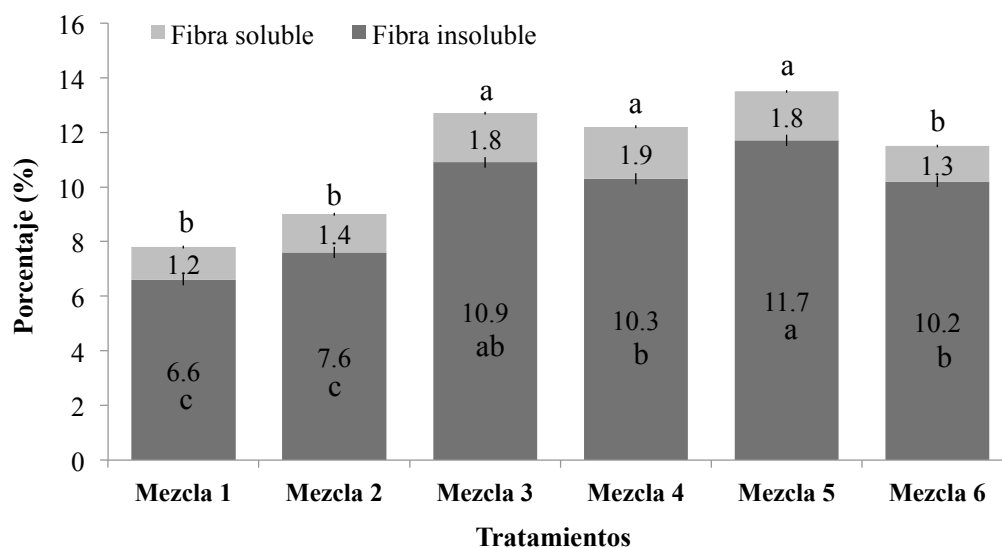
Varios estudios han demostrado que la fibra dietética, especialmente la fibra soluble en productos extrudidos, aumenta cuando se someten al proceso de extrusión (Zhang Bai y Zhang 2011), tal como se puede observar en la Tabla 6 que muestra el contenido de fibra soluble e insoluble de las diferentes mezclas antes de ser sometidas al proceso de extrusión, en las cuales el efecto de la adición de linaza resultó significativo para el contenido de fibra soluble y el porcentaje de fibra dietética total. Durante el proceso de extrusión, se produce una tensión de cizallamiento causada por la alta velocidad del tornillo, que junto con las altas temperaturas del proceso provoca la rotura de los enlaces químicos, creando partículas más pequeñas que se solubilizan como xilosa, glucosa, oligo y polímeros de arabinosa y, preferentemente, arabinosilanos ligeramente ramificados (Gualberto et al. 1997; Zhang Bai y Zhang 2011). Además, la estructura del almidón cambia, lo que puede conducir a la formación de almidón resistente, otro mecanismo posible que causa el aumento de la fibra durante el proceso de extrusión (Esposito et al. 2005).

**Tabla 6.** Contenido de fibra dietética insoluble y soluble de las mezclas sin extrudir\*

Tipo de fibra	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Soluble (%)	0.6 <sup>a</sup>	1.3 <sup>a</sup>	0.8 <sup>a</sup>	1.5 <sup>a</sup>	1.6 <sup>a</sup>	1.2 <sup>a</sup>
Insoluble (%)	10.5 <sup>a</sup>	9.7 <sup>a</sup>	8.9 <sup>a</sup>	9.9 <sup>a</sup>	12.0 <sup>a</sup>	12.6 <sup>a</sup>
Dietaria (%)	11.1 <sup>a</sup>	11.0 <sup>a</sup>	9.7 <sup>a</sup>	11.4 <sup>a</sup>	13.6 <sup>a</sup>	13.8 <sup>a</sup>

\*Promedios ± error estándar (EE). EE fibra soluble, 0.21; EE fibra insoluble, 1.58; EE fibra dietética total, 0.94. Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey.

Los resultados para el contenido de fibra dietética en los cereales extrudidos, muestran una diferencia significativa entre los tratamientos para fibra insoluble y soluble ( $P < 0.05$ ), lo que indica que la variación en las proporción de ingredientes (linaza y amaranto) y su interacción afecta significativamente el contenido de ambos tipos de fibra, en los cereales extrudidos (Figura 5).



**Figura 5.** Contenido de fibra soluble e insoluble por columnas y por color, de los cereales extrudidos. Promedios ± error estándar (EE). EE fibra insoluble, 0.2; EE fibra soluble, 0.05. Promedios por columnas y por color con letras diferentes muestran diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

Un producto alimenticio puede considerarse alto en fibra si contiene 6 g de fibra por cada 100 g de producto (Codex Alimentarius 2009). Por lo tanto, los cereales obtenidos son productos ricos en fibra (Figura 5), debido a la adición de ingredientes altos en fibra como el amaranto y linaza. Los cereales extrudidos de las mezclas 3, 4 y 5 tuvieron

mayor porcentaje de fibra soluble, y no presentan diferencia significativa entre ellos (Figura 5). Esto se puede explicar por el hecho de que los extrudidos 4 y 5 tuvieron el mayor contenido de linaza (9.8% y 9% respectivamente), que es una fuente significativa de fibra soluble, llegando a alcanzar hasta un 12.18% (Morris 2007). A su vez, el extrudido 3 tiene el mayor porcentaje de amaranto y linaza (41.7%) en su mezcla, lo que dio como resultado un alto contenido de fibra soluble. El resto de los extrudidos (mezclas 1, 2 y 6) tenían un bajo porcentaje de fibra soluble sin mostrar diferencias significativas entre ellos (Figura 5) porque contienen porcentajes más bajos de linaza. Además de la adición de ingredientes con alto contenido de fibra, el proceso de extrusión puede ser otro factor importante en el aumento de la fibra dietética en los cereales extruidos.

### **Índices de absorción y solubilidad de agua**

El índice de absorción de agua (IAA) en los extrudidos se vio afectado significativamente ( $P < 0.05$ ) por la adición de los ingredientes (linaza y amaranto) y su interacción, (Tabla 7). El cereal extruido de la mezcla 4 (9.8% de linaza, 19.6% de amaranto y 70.6% sémola de maíz) dio como resultado altos valores de IAA debido a su alto contenido de almidón (sémola de maíz), que durante el proceso de extrusión sufre cambios pronunciados en las propiedades de gelatinización, favoreciendo una mayor absorción de agua. Esto es consistente con el perfil de viscosidad amilográfica, donde los extrudidos con los valores más altos de viscosidad y mayores contenidos de almidón tienen los valores más altos de IAA (Figura 6). Por otro lado, el extrudido 3 (6.9% de linaza, 34.7% de amaranto y 58.4% de maíz) tenía un bajo contenido de almidón pero un mayor contenido de ingredientes con alto contenido de fibra (41.7% de amaranto y linaza) y mostró bajos valores de IAA, resultados similares se presentaron en los extrudidos 2 y 6 (Tabla 7). Estos efectos de la adición de fibra en productos extruidos fueron informados por Altan et al. (2008) en extrudidos de mezclas de cebada con orujo de tomate.

El índice de solubilidad de agua (ISA) es un indicador de la degradación de los componentes moleculares, un ejemplo es la cantidad de polisacáridos solubles del almidón liberados después de la extrusión, lo cuál es una medida del grado de

conversión del almidón durante el proceso de extrusión (Ding et al. 2005). La Tabla 7 muestra los efectos significativos en el ISA de los cereales extrudidos por la adición de los ingredientes, amaranto y linaza, en las mezclas. Los extrudidos de las mezclas 2, 5 y 6, con un alto contenido de fibra, presentaron los valores más altos de ISA (0.5), mientras que el extrudido de la mezcla 1, con un bajo contenido de fibra, y el extrudido de la mezcla 4, con un alto contenido de almidón, tuvo los valores más bajos de ISA (0.46 y 0.45, respectivamente) (Tabla 7). El aumento en el contenido de fibra provoca un aumento en los valores de ISA, que se puede atribuir a la ruptura de los polisacáridos estructurales por el proceso de extrusión. Se reportaron resultados similares de ISA en productos extrudidos durante la extrusión de mezclas de harina de arroz y maíz con adiciones de harina de semilla de linaza desengrasada. Esto se debió a que la harina de linaza desengrasada es alta en fibra y las moléculas de fibra interrumpen la estructura continua de la masa fundida en el extrusor, lo que dificulta la deformación elástica durante la extrusión (Ganorkar et al. 2016). Efectos similares sobre los valores de ISA para la adición de fibra en productos extrudidos fueron informados por Altan et al. (2008).

### **Densidad aparente**

La densidad aparente de los cereales extrudidos muestra cambios significativos ( $P < 0.05$ ) debido a la adición de los ingredientes en las mezclas (Tabla 7). El extrudido de la mezcla 6, con un alto contenido de grasa, presentó el valor de densidad más bajo. Esto se debe a que la grasa presenta valores de baja densidad y también porque los aceites contenidos en los cereales, cuando son extruidos, se someten a un proceso de emulsión debido a la fuerte presión; las gotas finas de grasa quedan recubiertas por almidones y proteínas, dejando la grasa encapsulada, causando una disminución en la densidad (Valls Porta 1993). Los cereales extrudidos de las mezclas 2 y 4 fueron ricos en proteínas y presentaron los valores de densidad más altos. La estructura terciaria rígida, la alta cohesión, los altos pesos moleculares y las funciones estructurales en las proteínas de cereales como el maíz, pueden aumentar la densidad de los productos alimenticios (Gálvez et al. 2006). Asimismo Ryu et al. (1993) informaron que la densidad de un producto extrudido se ve fuertemente afectada por el agua, la cantidad de fibra y el

contenido de grasa y almidón. Los cereales extrudidos de las mezclas 6 y 3, con contenidos similares de amaranto (27.6 y 34.7 g/100 g respectivamente), dieron como resultado los valores de densidad más bajos (4.6 y 4.7 kg L<sup>-1</sup>, respectivamente; Tabla 7). Estos resultados son consistentes con los mostrados por Ilo et al. (1999), quienes evaluaron el efecto del proceso extrusión sobre las propiedades de extrudidos hechos a base de mezclas de harina de arroz y amaranto, observando que el amaranto tuvo una influencia importante en la densidad del producto, resultando en un valor mínimo para los extrudidos con un contenido de amaranto de 30 g/100 gramos de mezcla. Otro estudio mostró que la extrusión de harina de arroz y maíz fortificado con linaza conduce a aumentos en los valores de densidad aparente (Ganorkar y Jain 2015).

**Tabla 7.** Propiedades físicas y funcionales de los cereales extrudidos\*

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	EE
DA (Kg L <sup>-1</sup> )	0.5 <sup>a</sup>	0.49 <sup>abc</sup>	0.47 <sup>cd</sup>	0.49 <sup>ab</sup>	0.47 <sup>bcd</sup>	0.46 <sup>d</sup>	0.006
ISA	0.46 <sup>bc</sup>	0.5 <sup>a</sup>	0.49 <sup>ab</sup>	0.45 <sup>c</sup>	0.5 <sup>a</sup>	0.5 <sup>a</sup>	0.007
IAA	2.9 <sup>b</sup>	2.5 <sup>c</sup>	2.5 <sup>c</sup>	3.4 <sup>a</sup>	2.9 <sup>b</sup>	2.5 <sup>c</sup>	0.05
IE	3.11 <sup>c</sup>	3.10 <sup>c</sup>	3.06 <sup>d</sup>	3.33 <sup>a</sup>	3.17 <sup>b</sup>	3.09 <sup>c</sup>	0.007
Dureza (N)	5.0 <sup>ab</sup>	4.9 <sup>bc</sup>	4.7 <sup>c</sup>	4.7 <sup>c</sup>	5.2 <sup>a</sup>	4.8 <sup>bc</sup>	0.16
Crujibilidad (N/mm)	26.9 <sup>a</sup>	25.4 <sup>a</sup>	24.9 <sup>a</sup>	25.7 <sup>a</sup>	26.7 <sup>a</sup>	26.1 <sup>a</sup>	1.3

\*Promedios ± error estándar (EE). Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ). DA= densidad aparente, IE= índice de expansión.

### Índice de expansión

De acuerdo al análisis del índice de expansión, se pudo observar que la adición de los diferentes ingredientes en sus distintas proporciones, y su interacción, afectó significativamente la expansión de los cereales extrudidos ( $P < 0.05$ ) (Tabla 7). La característica de expansión de los cereales extrudidos instantáneos es muy importante ya que está directamente relacionada con la aceptabilidad del consumidor, debido a que típicamente los cereales extrudidos deben tener una estructura inflada, ligera y crujiente (Ainsworth et al. 2007).

La presencia de almidón es un factor importante para que se lleve a cabo una adecuada expansión en los productos extrudidos (Chinnaswamy y Hanna 1991). Por ejemplo, el extrudido de la mezcla 4 que contiene un mayor porcentaje de sémola de maíz (almidón) presentó un mayor índice de expansión (3.33), enseguida el extrudido de la mezcla 5 (3.17) y por último los cereales extrudidos que contienen menor cantidad de sémola de maíz y que no tuvieron diferencia significativa entre ellos presentaron los valores menores de índice de expansión, estos fueron los extrudidos de las mezclas 1, 2 y 6 (Tabla 7). Cabe destacar que así como contienen mayor contenido de almidón, las mezclas con valores de expansión más altos también contienen menor porcentaje de los componentes con alto contenido de fibra dietética: amaranto y la linaza; mientras que las mezclas 1, 2 y 6 con mayor contenido de estos ingredientes presentaron índices de expansión más bajos, debido a que un alto contenido de fibra dietética puede afectar significativamente la expansión de los productos extrudidos. Esto es consistente con los resultados informados por Altan et al. (2008), quienes realizaron extrudidos hechos de cebada y orujo de tomate, señalando que al aumentar el nivel de orujo de tomate, disminuyó la expansión del producto final, debido a que el aumento en la tasa de expansión depende de la gelatinización del almidón que disminuyó al agregar el orujo de tomate (fibra) a las diferentes mezclas. Confirmando lo anterior, en un estudio donde se agregó fibra de celulosa pura al almidón de maíz, disminuyó la solubilidad del almidón y las fibras de celulosa produjeron una reducción importante en la solubilidad del almidón, lo que causó un menor grado de gelatinización y, por lo tanto, de expansión (Chinnaswamy y Hanna 1991). Huth et al. (2000), evaluaron las propiedades funcionales de cebada extrudida alta en fibra dietética, la cuál no expandió debido al alto contenido de fibra. En mezclas extrudidas de almidón de maíz, concentrado de proteína de suero y fibra de tequilana de agave, el extrudido con mayor contenido fibra de agave, presentó el menor índice de expansión, mientras que el extrudido con menor fibra de agave (1%) presentó el índice de expansión más alto. El índice de expansión se vio afectado por la incorporación de fibra, mostrando una diferencia significativa en comparación con los controles (Santillán-Moreno et al. 2011). El efecto de la fibra sobre la expansión de los productos extrudidos depende principalmente de sus interacciones con el almidón y, por lo tanto, del tipo y la cantidad de fibra. La fibra insoluble reduce significativamente los

volúmenes de expansión y aumenta la densidad de los productos extruidos; por el contrario, la fibra soluble conduce a mejores volúmenes de expansión, mientras que afecta menos la densidad aparente de los productos extruidos en comparación con los componentes de fibra insolubles. La diferencia en el comportamiento de expansión entre la fibra soluble e insoluble se puede explicar por sus interacciones con el almidón, las diferencias en la absorción de agua y el comportamiento de plastificación, pero también por las transformaciones fisicoquímicas que experimentan durante la extrusión (Robin et al. 2012). En este caso, el cereal extruido de la mezcla 4 que presentó una mejor expansión, es también el que presenta un mayor porcentaje de fibra soluble (1.9%).

### **Medición de textura: dureza y crujibilidad**

Un parámetro de calidad importante de los cereales listos para el consumo es la textura. La Tabla 7 muestra los valores de dureza y crujibilidad de los cereales extruidos elaborados a partir de las diferentes mezclas de ingredientes. El parámetro de crujibilidad de los cereales extruidos no fue significativamente diferente ( $P > 0.05$ ) entre las diversas mezclas. Se han informado hallazgos similares para extruidos de maíz con amaranto, donde se encontró que un contenido de amaranto de 20 a 35% no tuvo un efecto sustancial sobre la crujibilidad (Ramos-Diaz et al. 2015), estos rangos de amaranto fueron similares a los utilizados en este estudio (19.6-34.7%). Otro factor que pudo influir fue que todos los tratamientos fueron procesados bajo las mismas condiciones de extrusión (temperatura, velocidad del tornillo, humedad, tamaño del dado, configuración del tornillo).

Por otro lado, el parámetro de dureza en los cereales se vio afectado significativamente ( $P < 0.05$ ) debido a la mezcla de los ingredientes agregados (linaza y amaranto) y su interacción. El cereal extruido de la mezcla 5, con un alto contenido de fibra dietética, presentó un valor de dureza más alto. La adición de fibra dietética a menudo conduce a reducir los volúmenes de expansión y aumenta la densidad de los cereales extruidos, provocando texturas más duras y menos crujientes (Robin et al. 2012). Este resultado es consistente con los datos reportados por Ganorkar y Jain (2015), quienes demostraron que un aumento en la adición de linaza causa un aumento en la dureza de los productos extruidos. En otros estudios, Brennan et al. (2008), reportaron una mayor fuerza de

ruptura con un incremento del contenido de salvado de trigo de hasta 15% en cereales extrudidos para desayuno. Por el contrario, también se ha informado que las fibras solubles, como la inulina, ofrecen una textura más favorable en comparación con las fibras insolubles, como la fibra de salvado de cereales (Blake 2006). Además, Brennan et al. (2008) observaron un ligero cambio al agregar inulina o goma guar a la harina de maíz extrudida. Esto se puede corroborar en nuestros resultados, donde los cereales extrudidos de la mezcla 3 y 4 (Figura 5) que contienen el mayor porcentaje de fibra soluble, presentan los valores más bajos de dureza (4.7 N, Tabla 7).

### Propiedades de viscosidad en los cereales extrudidos

La adición de amaranto y linaza a las mezclas extrudidas afectó significativamente ( $P < 0.05$ ) el perfil de viscosidad amilográfica (RVA) de los cereales extrudidos (Figura 6). La viscosidad máxima ( $V_{max}$ ), es donde se produce el mayor grado de gelatinización del almidón. En general, los valores de viscosidad máxima obtenidos para cada uno de los cereales extrudidos fueron bajos (Tabla 8). La mezcla 4, con un alto contenido de almidón (70.6% de sémola de maíz), tuvo el mayor valor de  $V_{max}$ , mientras que la mezcla 3, con un menor porcentaje de almidón (58.4% de sémola de maíz), tuvo el valor de  $V_{max}$  más bajo (Figura 6). Una tendencia similar se observó para los otros parámetros de viscosidad (viscosidad mínima,  $V_{min}$ ; viscosidad final  $V_{fin}$  y viscosidad de retrogradación; Tabla 8), donde el contenido de almidón influye fuertemente en las propiedades de viscosidad de los cereales extrudidos.

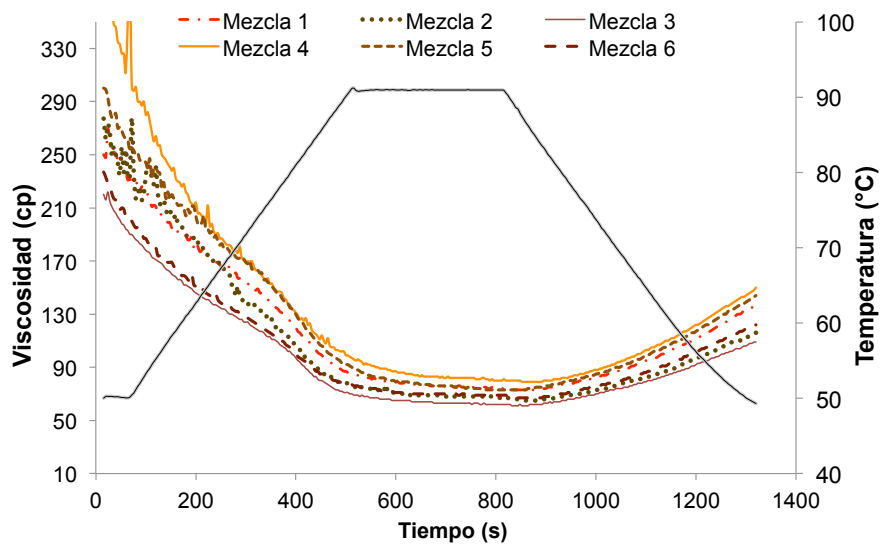
**Tabla 8.** Propiedades de viscosidad de los cereales extrudidos\*

Propiedad (cp)	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	EE
$V_{max}$	86.2 <sup>b</sup>	75.3 <sup>bc</sup>	66.7 <sup>c</sup>	99.3 <sup>a</sup>	85.6 <sup>b</sup>	76.1 <sup>bc</sup>	2.4
$V_{min}$	69.9 <sup>abc</sup>	65.7 <sup>bc</sup>	63.2 <sup>c</sup>	79.8 <sup>a</sup>	75.2 <sup>ab</sup>	70.2 <sup>abc</sup>	2.3
$V_{fin}$	151 <sup>a</sup>	124.5 <sup>bc</sup>	111.1 <sup>c</sup>	162.5 <sup>a</sup>	154.8 <sup>a</sup>	130.5 <sup>b</sup>	2.7
Viscosidad retrogradación	81.1 <sup>a</sup>	58.9 <sup>c</sup>	48.0 <sup>c</sup>	82.7 <sup>a</sup>	75.1 <sup>a</sup>	60.5 <sup>bc</sup>	2.8

\*Promedios  $\pm$  error estándar. Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).



La estructura de los gránulos de almidón puede dañarse por el proceso de extrusión debido a la combinación de la fuerza de corte y la temperatura dentro del cañón. Por otro lado, es posible que la formación de estructuras complejas durante el proceso de extrusión-cocción a través de interacciones entre complejos de almidón-lípido y/o paredes de almidón-proteína evite la gelatinización adecuada del almidón (Wang y Kim 1998). Otro factor que influye en las propiedades de viscosidad de los cereales extrudidos es la fibra dietética, que conduce a una disminución en la fracción de almidón gelatinizable, debido a su reemplazo por la presencia de la fibra (Santillán-Moreno et al. 2011). Todos estos factores impiden la gelatinización completa del almidón, causando una disminución de la viscosidad. Se observaron resultados similares en un estudio en el que se demostró que el aumento del nivel de amaranto en extrudidos de mezclas de arroz con amaranto disminuyó la viscosidad de los productos extrudidos. Las curvas de viscosidad de los productos extrudidos mostraron una viscosidad mucho más baja en comparación con las harinas no extrudidas, estas observaciones indican una degradación intensiva del almidón durante el proceso de extrusión-cocción (Ilo et al. 1999). En mezclas extruidas de almidón de maíz, concentrado de proteína de suero y fibra de Agave tequilana, las muestras extrudidas con fibra de agave mostraron una viscosidad máxima, mínima y final significativamente menor en comparación con las muestras extrudidas sin fibra de agave. Estos resultados se atribuyeron a la interferencia de la fibra con la gelatinización o absorción de agua de los gránulos de almidón (Santillán-Moreno et al. 2011). Por otro lado, se presentaron valores bajos viscosidad de retrogradación para todos los cereales extrudidos, lo que indica bajas tasas de retrogradación y sinéresis del almidón. Durante el enfriamiento, la re-asociación de las moléculas de almidón, especialmente la amilosa, da como resultado la formación de una estructura de gel y, por lo tanto, la viscosidad aumentará hasta alcanzar la viscosidad final. Esta fase se describe comúnmente como la región de retroceso durante la cual ocurre la retrogradación y el reordenamiento de las moléculas del almidón (Ragae y Abdel-Aal 2006).



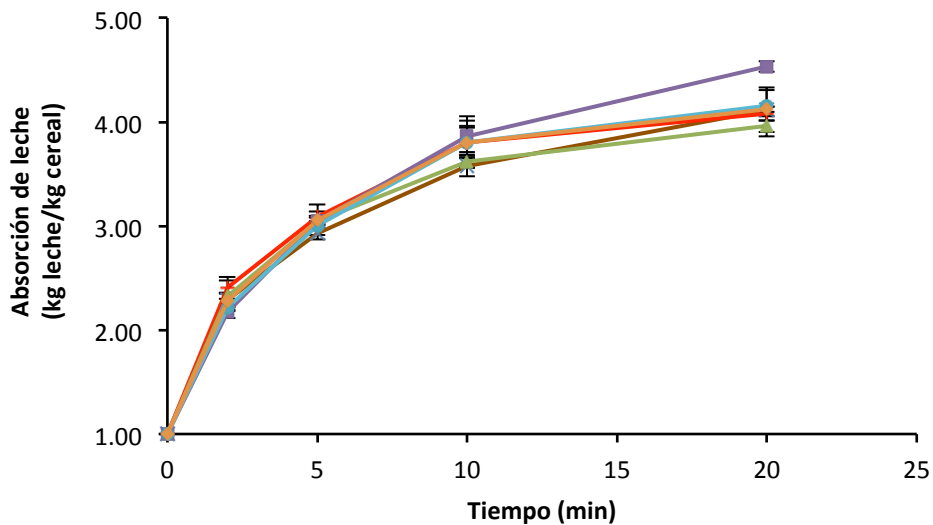
**Figura 6.** Perfil de viscosidad amilográfica de los cereales extrudidos, obtenido con un analizador rápido de viscosidad (RVA).

### **Cinéticas de absorción en leche**

El análisis de las cinéticas de absorción en leche de los diferentes cereales extrudidos no mostró una diferencia significativa entre los tratamientos ( $P > 0.05$ ) (Figura 7). Un factor importante que pudo influir para que se presentará este fenómeno, fue que las condiciones de extrusión fueron iguales para todos los tratamientos (temperatura, velocidad del tornillo, humedad, tamaño del dado, configuración del tornillo). Diversos estudios revelan que estas condiciones del proceso de extrusión, impactan de manera significativa en la estructura y porosidad de los cereales extrudidos y por lo tanto, en su capacidad de absorber y retener agua o leche. En un estudio realizado por Sacchetti et al. (2005), se reporta un efecto significativo de la temperatura y porcentaje de humedad para el desarrollo de cereales para desayuno hechos a base de almidón de maíz, sobre la densidad, dureza, cinéticas de hidratación y los cambios de textura de los productos durante el remojo.

En otro estudio realizado por Zhang et al. (2011), se demostró que distintas condiciones del proceso de extrusión mejoraron algunas propiedades de la fibra soluble de salvado de avena, como una mayor capacidad de hinchamiento y capacidad de retención de disolvente, que también podría explicarse por su alto peso molecular y contenido de fibra dietética soluble. Hromádková et al. (2003), estudiaron la influencia del método de

secado en la capacidad de hinchamiento del  $\beta$ -glucano y llegaron a la conclusión de que la existencia de una microestructura porosa del  $\beta$ -glucano era útil para la capacidad de hinchamiento. La formación de capilares y una estructura porosa podría explicar la mejora de la capacidad de retención de disolvente (Sharma et al. 2011). Por lo tanto, un factor muy importante es la estructura y porosidad del cereal. La porosidad de los cereales se relaciona fuertemente con la capacidad de absorción de leche y también esta fuertemente relacionada con la crujibilidad (Loh y Mannell 1990). De igual manera, en este estudio, el parámetro de crujibilidad y el análisis de las cinéticas de absorción en leche en los cereales extrudidos no resultaron significativos (Tabla 7); es decir los cereales presentan una estructura parecida de porosidad (crujibilidad) por lo que no presentan diferencia significativa en las cinéticas de absorción en leche. Esto también se puede corroborar con el análisis de microscopía electrónica de barrido donde se puede mostrar que las microestructuras de los cereales extrudidos son similares, presentando la misma capacidad en las celdas de sus estructuras para absorber leche.



**Figura 7.** Cinéticas de absorción en leche para los cereales extrudidos. x= Mezcla 1<sup>a</sup>, + = Mezcla 2<sup>a</sup>, ▲= Mezcla 3<sup>a</sup>, ■= Mezcla 4<sup>a</sup>, ●= Mezcla 5<sup>a</sup> y ◆= Mezcla 6<sup>a</sup>. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .

En un estudio, donde se evaluó el impacto de la adición de  $\beta$ -glucanos en cereales extrudidos de avena, sobre la capacidad de hidratación de agua, después de remojar los cereales durante 1 minuto y enseguida durante cinco minutos, se observó una diferencia

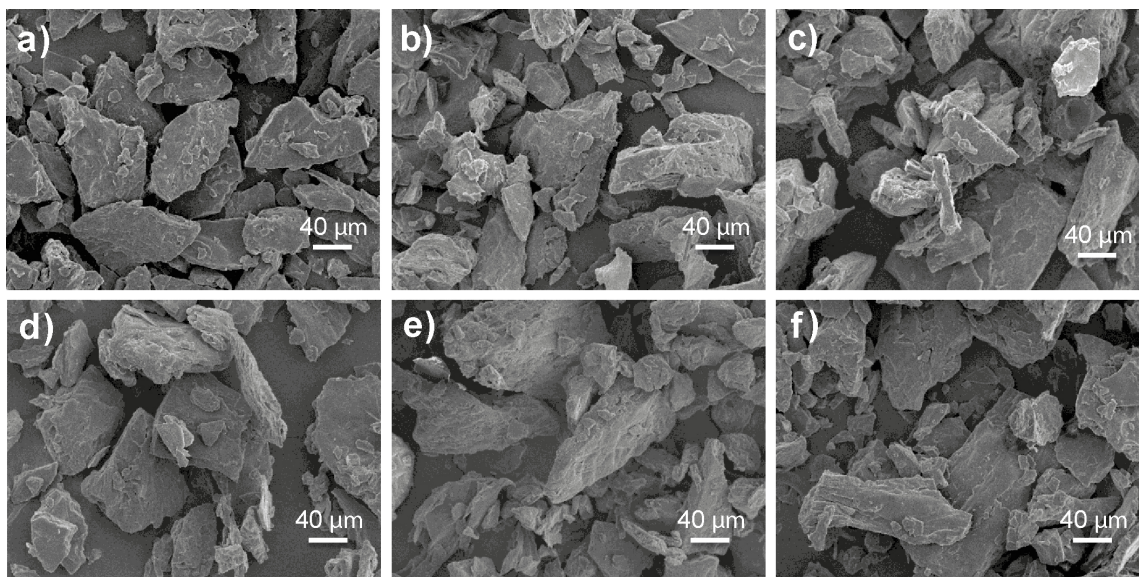
significativa al retener agua a los 5 minutos, siendo el cereal con 5.3% de  $\beta$ -glucanos, con menor expansión y crujibilidad, el que presentó el aumento más bajo de retención de agua; esto se vio afectado por el grado de porosidad o expansión del extruido, ya que una menor porosidad y paredes celulares más gruesas en los extrudidos conducen a una menor absorción de agua (Yao et al. 2011).

En un estudio realizado por Machado et al. (1999), determinaron el efecto de la leche entera y leche desgrasada sobre las cinéticas de absorción de cereales extrudidos para desayuno, observándose que la grasa desempeña un papel importante en el mecanismo del proceso de absorción, el cual, se atribuyó a la deposición de una capa de grasa en la superficie de la matriz sólida, que oculta el agua y la absorción de sólidos. Los glóbulos grasos que se depositan en la superficie crean una barrera para la transferencia de humedad a la matriz sólida del cereal, y el cereal retiene mejor su estructura celular, teniendo lugar cierta transferencia de masa a través de los poros del cereal. Los fenómenos de relajación estructural de la matriz sólida del cereal parecen, así, controlar el proceso de captación de humedad. Por lo tanto, se concluyó, que el uso de leche entera mantiene mejor la estructura del cereal durante las cinéticas de absorción en leche, tal como se observó y utilizó en el presente estudio.

En un estudio donde se evaluó la incorporación de fibra dietética de salvado de trigo y avena en cereales extrudidos, sobre las propiedades de rehidratación en leche, mediante resonancia magnética, se observó una pérdida de dureza y crujibilidad después de la inmersión en leche. La dureza de los productos secos estuvo bien correlacionada con la de los productos empapados. Una baja cantidad de adición de fibra parece dar como resultado un mantenimiento de la dureza cuando se vierte en la leche; esto se confirma mediante las mediciones de resonancia magnética que muestran una penetración más lenta de la leche en los gránulos que contienen fibra dietética. Por lo tanto, se puede inferir que la evaluación de la estructura de los cereales extrudidos puede conducir a una mejor comprensión del efecto de la adición de fibra en las propiedades de textura y rehidratación (Chassagne-Berces et al. 2011).

### Microscopía electrónica de barrido

Las micrografías electrónicas de barrido revelaron el impacto de los diferentes ingredientes sobre la estructura de los cereales extrudidos (Figura 8). Después del proceso extrusión, se puede observar que la combinación de fuerza de cizallamiento y temperatura dentro del cañón provocó cambios microestructurales en los extrudidos de las diferentes mezclas (Cueto et al. 2015). El análisis microestructural muestra que la adición de amaranto y linaza incrementó el contenido de fibra en las mezclas, dando como resultado aglomerados compactos, un aumento de la cristalinidad y estructuras laminares grandes y compactas (Figura 8c-f). Esto puede atribuirse a un contenido alto en proteínas (12%) y fibra (9-13%). La fibra dietética tiene una tendencia a romper las paredes celulares y promueve la rotura de las celdas de aire durante la extrusión, lo que impide que las matrices se expandan (Vadukapuram et al. 2014); resultando en texturas más duras, densidades más altas y estructuras más compactas como se muestra en las micrografías (Figura 8c-f). Resultados similares fueron encontrados por Zhang et al. (2011) y Cueto et al. (2015).



**Figura 8.** Micrografías de los cereales extrudidos. (a) Cereal extrudido de la mezcla 1, (b) Cereal extrudido de la mezcla 2, (c) Cereal extrudido de la mezcla 3, (d) Cereal extrudido de la mezcla 4, (e) Cereal extrudido de la mezcla 5, (f) Cereal extrudido de la mezcla 6.

### **Análisis de color**

Los parámetros de color,  $L$ ,  $a$  y  $b$  en los cereales extrudidos, se vieron afectados significativamente por la adición de los ingredientes (linaza y amaranto) y su interacción ( $P < 0.05$ ) (Tabla 9). La característica física y sensorial del color en los cereales extrudidos es un parámetro muy importante para evaluar la aceptabilidad del producto final por parte del consumidor y depende en gran medida del tipo de materia prima, ingredientes y aditivos utilizados (Peřsa et al. 2016). En este caso, la mezcla 5, con mayor contenido de fibra dietética total (13.5%), presentó el valor más bajo de luminosidad, debido a que la presencia de fibra puede disminuir la claridad en los productos extrudidos; tal como lo señalan Santillán-Moreno et al. (2011) en un estudio, donde al agregar fibra de agave tequilana a extrudidos de almidón de maíz y proteína de suero, los valores de  $L$  (luminosidad) fueron disminuyendo significativamente debido a la presencia de la fibra.

En cambio la mezcla 2 con menor contenido de fibra dietética (9%) y la mezcla 3 con mayor porcentaje de amaranto (34.7%), presentaron el valor más alto de luminosidad (61.9) (Tabla 9). Estos valores concuerdan con un estudio realizado por Peřsa et al. (2016), donde los valores de luminosidad de cereales extrudidos hechos a base de maíz con adiciones de harina de calabaza, alcachofa de Jerusalén y amaranto, fueron mayores al agregar amaranto a las mezclas. Los valores para el parámetro de color  $a$ , indican resultados positivos, marcando una tendencia de color en los extrudidos hacia el color rojo, lo cual se puede deber a la presencia de ingredientes como la linaza que presenta este tipo de tonalidades (Wu et al. 2007). Los resultados del parámetro de color  $b$ , muestra la tendencia de los cereales extrudidos hacia el color amarillo, esto se debe a los ingredientes que se utilizaron con este tipo de tonalidad (amaranto y sémola de maíz) y a la cantidad de fibra dietética, siendo la mezcla 2 quien presentó el valor más alto (12.4), debido a su bajo porcentaje de fibra dietética (9%) y la mezcla 5 con mayor contenido de fibra dietética la que presentó el valor más bajo (11.7) (Tabla 9). En un estudio realizado por Vadukapuram et al. (2014), donde evaluaron snacks extrudidos de frijol fortificados con linaza en niveles del 5 al 20%, el parámetro de luminosidad ( $L$ ), se vio afectado significativamente por la adición de la linaza, presentándose una disminución de la luminosidad y por lo tanto un oscurecimiento de los snacks conforme aumentaba el

porcentaje de la cantidad de linaza. Resultados similares fueron reportados por Wu et al. (2007), quienes evaluaron el parámetro de color en extrudidos de linaza y maíz, encontrando que los valores de  $L$ ,  $a$  y  $b$ , se vieron afectados de manera significativa por el contenido de harina de linaza. Los valores de  $L$  (luminosidad) y de  $b$  (amarillo), disminuyeron, mientras que los de  $a$  (enrojecimiento) aumentaron; efectos similares se presentaron en este estudio. En otro estudio donde se elaboraron extrudidos hechos a base de harina de maíz y chía, el color total de las muestras dependió más fuertemente del contenido de la chía, su efecto fue reducir los valores de  $L$  (luminosidad) y  $b$  (amarillo) y generar pequeños cambios en los valores  $a$  (rojos) (Byars y Singh 2015). Estos estudios nos muestran que los ingredientes con colores más oscuros en las mezclas, impactan de manera significativa en los parámetros de color, como en este caso lo fue la linaza.

Además, estos cambios en el color de las mezclas extrudidas podrían deberse también a diversas reacciones que se originan durante el proceso de extrusión, las cuáles incluyen básicamente reacción de Maillard, caramelización, hidrólisis de carbohidratos, etc., así como reacciones no enzimáticas, como la degradación de pigmentos (Camire et al. 1990). Asimismo, los cambios en el color también pueden ser un indicador de la intensidad del proceso y pueden estar relacionados con cambios químicos (Berset, 1989).

**Tabla 9.** Análisis de color de los cereales extrudidos\*

Parámetro de color	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	EE
$L^*$	61.7 <sup>a</sup>	61.9 <sup>a</sup>	61.9 <sup>a</sup>	61.5 <sup>a</sup>	61.0 <sup>b</sup>	61.4 <sup>ab</sup>	0.11
$a^*$	2.6 <sup>b</sup>	2.7 <sup>b</sup>	2.6 <sup>b</sup>	2.7 <sup>b</sup>	2.4 <sup>b</sup>	3.0 <sup>a</sup>	0.02
$b^*$	12.2 <sup>ab</sup>	12.4 <sup>a</sup>	12.0 <sup>bc</sup>	12.3 <sup>ab</sup>	11.7 <sup>c</sup>	12.3 <sup>ab</sup>	0.05

\*Promedios  $\pm$  error estándar (EE). Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

## Evaluación sensorial

La finalidad del análisis sensorial fue evaluar la aceptación de los cereales extrudidos obtenidos en comparación con cereales comerciales con características similares; sin embargo, no encontramos cereales extrudidos comerciales que fueran expandibles, altos en fibra y con características sensoriales aceptables, por lo que se tuvieron que realizar dos estudios, el primero con cereales comerciales expandibles y el segundo, con cereales comerciales altos en fibra.

Para su realización se utilizó el cereal extrudido de la mezcla 5 que fue el que obtuvo una mejor aceptación de los seis tratamientos, obteniendo un grado de preferencia de 1.6 en la prueba de ordenamiento. Los resultados obtenidos para la comparación con cereales expandibles comerciales muestran una diferencia significativa para el grado de preferencia según la prueba de Friedman (valor  $T=18.2 > \text{Valor crítico}=5.99$ ,  $\alpha 0.05$ ), donde se puede observar que el extrudido de la mezcla 5 es igual de preferido que el cereal de la marca Honey Nut Scooters®, pero es diferente significativamente con el cereal comercial de la marca Cheerios®, tanto para la prueba con cereal sin leche como para la prueba de cereal con leche (Tabla 10).

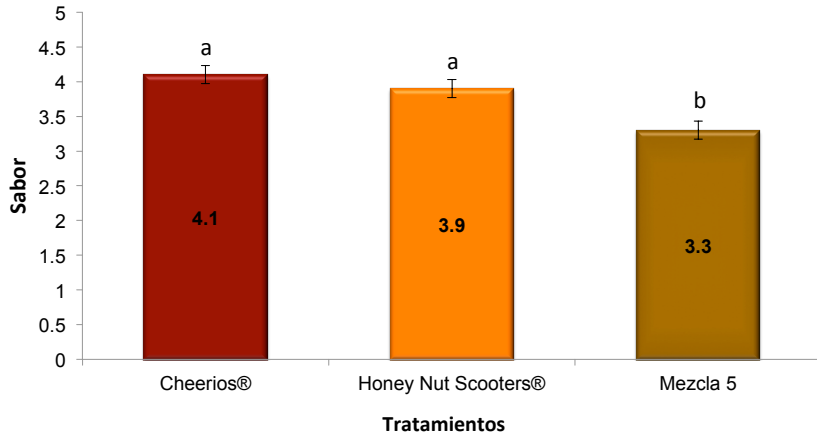
**Tabla 10.** Grado de preferencia para el cereal extrudido (mezcla 5) y cereales extrudidos comerciales\*

Grado de preferencia	Mezcla 5	Cheerios®	Honey Nut Scooters®
Cereal sin leche	2.5 <sup>b</sup>	1.5 <sup>a</sup>	2.1 <sup>b</sup>
Cereal con leche	2.4 <sup>b</sup>	1.4 <sup>a</sup>	2.1 <sup>b</sup>

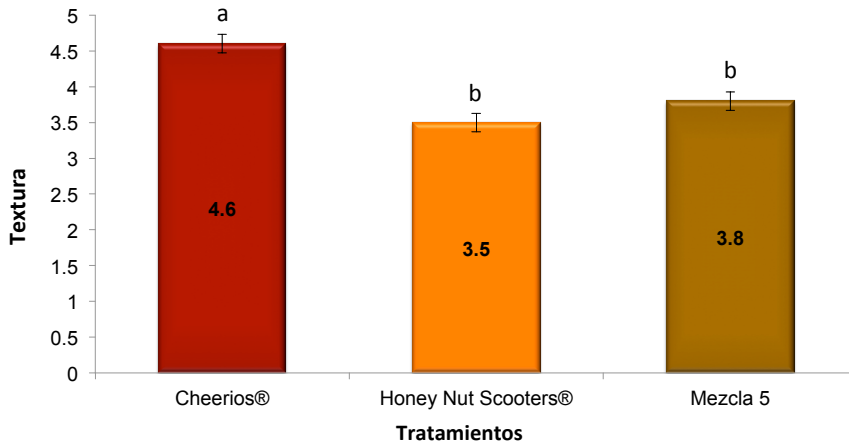
\*Promedios por filas con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Friedman,  $\alpha=0.05$ .

En el caso del análisis del grado de satisfacción se presentó una diferencia significativa entre los tres cereales para los atributos de sabor, textura y color ( $P < 0.05$ ). En este caso el extrudido de la mezcla 5 fue diferente a los otros dos cereales en cuanto al atributo de sabor con la puntuación más baja (Figura 9), esto se puede deber a que los cereales comerciales expandibles están añadidos con azúcar y sabores artificiales que los hacen más atractivos para el consumidor. En cuanto a los atributos de textura y color no presentó diferencia significativa con el cereal de la marca Honey Nut Scooters®, siendo igual de aceptado que este cereal comercial (Figuras 10 y 11).

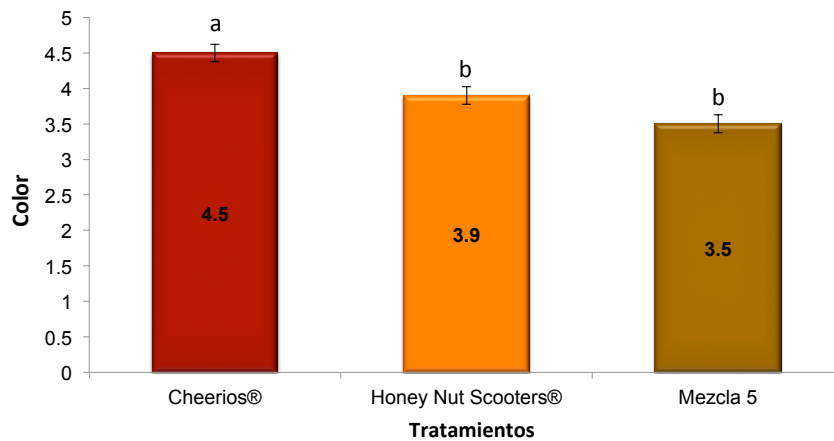




**Figura 9.** Grado de satisfacción para el atributo de sabor de los cereales extrudidos. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .



**Figura 10.** Grado de satisfacción para el atributo de textura de los cereales extrudidos. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .



**Figura 11 .** Grado de satisfacción para el atributo de color de los cereales extrudidos. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .

El análisis sensorial para el grado de preferencia con cereales comerciales altos en fibra mostró una diferencia significativa para la prueba de cereal sin leche (valor  $T=19.5 >$  Valor crítico=5.99,  $\alpha$  0.05), pero no presentó diferencia significativa para la prueba de cereal con leche (valor  $T=4.5 <$  Valor crítico=5.99,  $\alpha$  0.05), por lo que el cereal extrudido (mezcla 5) fue igual de preferido que los cereales comerciales altos en fibra (All-Bran®, Bran Flakes®) cuando fue consumido con leche. En cuanto a la prueba sin leche no presentó diferencia significativa con el Bran Flakes®, pero si con el cereal All-Bran® (Tabla 11).

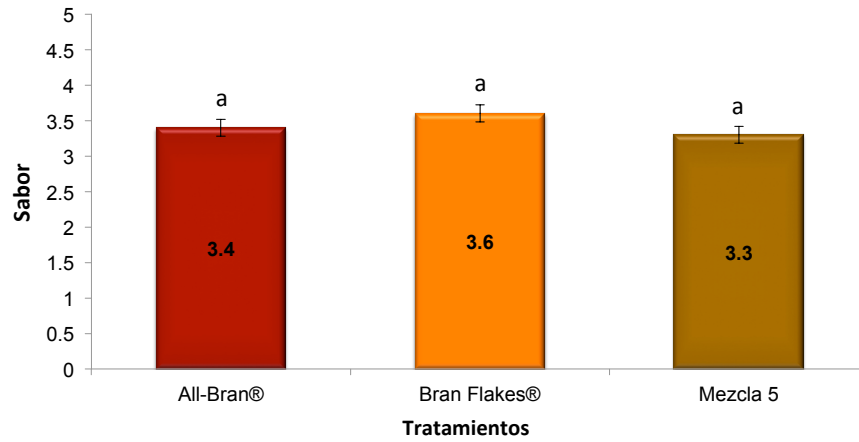
**Tabla 11 .** Grado de preferencia para el cereal extrudido (mezcla 5) y cereales comerciales altos en fibra\*

<b>Grado de preferencia</b>	<b>Mezcla 5</b>	<b>All-Bran®</b>	<b>Bran Flakes®</b>
Cereal sin leche	2.5 <sup>a</sup>	1.6 <sup>b</sup>	1.9 <sup>a</sup>
Cereal con leche	2.3 <sup>a</sup>	1.9 <sup>a</sup>	1.9 <sup>a</sup>

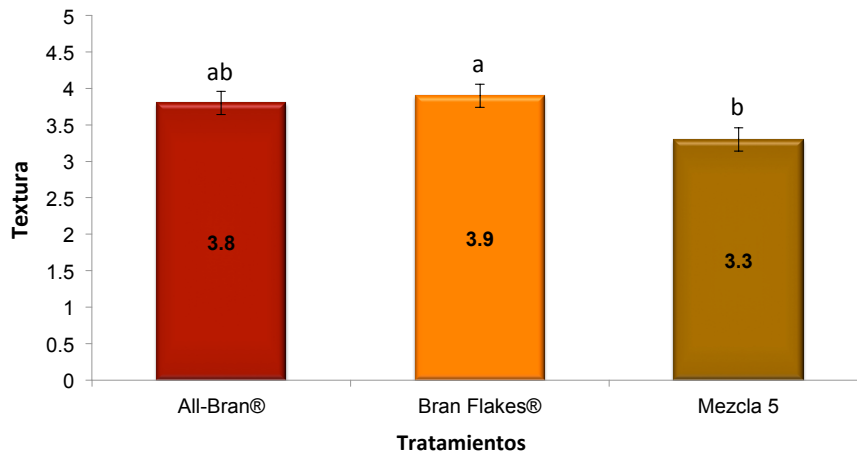
\*Promedios por filas con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Friedman,  $\alpha=0.05$ .

Para el análisis del grado de satisfacción con cereales comerciales altos en fibra se presentó una diferencia significativa para los atributos de textura y color ( $P < 0.05$ ); pero no se presentó diferencia significativa para el atributo de sabor ( $P > 0.05$ ), por lo que el cereal extrudido (mezcla 5) es igual de aceptado que los cereales comerciales altos en fibra en cuanto al sabor (Figura 12). Para los atributos de textura y color fue igual de aceptado que el cereal All-Bran®, ya que no presentaron diferencia significativa entre ellos, pero si con el cereal Bran Flakes®. (Figuras 13 y 14).

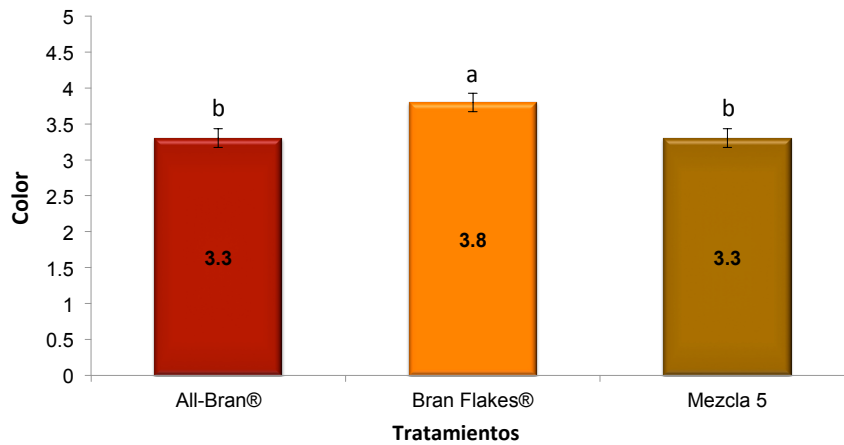
La importancia de realizar este tipo de estudios radica en que hoy en día la evaluación sensorial de los alimentos, constituye un pilar fundamental para el diseño y desarrollo de nuevos productos alimenticios (O'Mahony 1990), sobre todo en el caso de cereales extrudidos instantáneos que tienen una gran demanda en el mercado por ser alimentos de fácil preparación, alto valor nutrimental y que se adapta muy bien al estilo de vida actual. Es por esto, que se han realizado este tipo de estudios con productos extrudidos para mejorar sus características sensoriales.



**Figura 12.** Grado de satisfacción para el atributo de sabor en cereales altos en fibra. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .



**Figura 13.** Grado de satisfacción para el atributo de textura en cereales altos en fibra. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .



**Figura 14.** Grado de satisfacción para el atributo de color en cereales altos en fibra. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .

Altan et al. (2008), evaluaron la aceptabilidad de productos extrudidos elaborados a partir de mezclas de cebada y orujo de tomate. Los resultados mostraron que la puntuación más baja fue para el extrudido que no tenía orujo de tomate, mientras que la calificación más alta fue para el extrudido con 10% de orujo de tomate. Esto coincide con los resultados de este estudio donde un cereal extrudido alto en fibra tuvo una buena aceptación por los consumidores. De la misma manera, Clark y Johnson (2002), realizaron un análisis de aceptación de un cereal y una barra de desayuno enriquecidos con fibra de trigo, los cuales tuvieron un gran éxito.

En otro estudio, extrudidos con una mezcla de leguminosas, sorgo y arroz presentaron una textura crujiente y obtuvieron la mejor puntuación para las características sensoriales de aceptación (Lakshmi et al. 2014). Cereales extrudidos para desayuno hechos con mezclas de salvado de maíz y harina de avena, con porcentajes de 30 y 40% de salvado de maíz, presentaron buenas puntuaciones para los atributos sensoriales de color, sabor y textura (Holguín-Acuña et al. 2008). Moya (2008), utilizó una prueba para evaluar los perfiles sensoriales del atributo de sabor y textura en productos extrudidos hechos de avena, salvado y nopal. Los resultados mostraron que el tratamiento con adición de nopal deshidratado tenía una mejor aceptación con respecto a un cereal comercial de referencia.

### **Análisis *in vivo*, perfil de glucosa y lípidos sanguíneos**

El análisis proximal realizado a las dietas preparadas para el análisis *in vivo*, mostró una diferencia significativa entre los diferentes tratamientos ( $P < 0.05$ ) debido a la adición de los diferentes cereales extrudidos e ingredientes (Tabla 12). También se realizó un análisis del contenido de fibra dietética soluble e insoluble para todas las dietas preparadas, para el cuál sólo resultó significativo el análisis de fibra soluble ( $P < 0.05$ ) (Tabla 13); esto se puede explicar debido a que el contenido de fibra se trató de igualar a la dieta control, pero ésta sólo toma en cuenta la fibra cruda (fibra insoluble), mientras que el contenido de fibra soluble fue dado por la adición de los diferentes cereales extrudidos, los cuales la contienen en diferentes proporciones gracias a la adición de la linaza y el amaranto (Figura 5).

**Tabla 12.** Composición proximal de las dietas preparadas para el análisis *in vivo*\*

Componente (%)	Dieta 1	Dieta 2	Dieta 3	Dieta 4	Dieta 5	Dieta 6	Dieta control
Humedad	5.8 <sup>ab</sup>	6.2 <sup>a</sup>	5.3 <sup>bc</sup>	5.7 <sup>bc</sup>	5.7 <sup>abc</sup>	5.2 <sup>c</sup>	4.6 <sup>d</sup>
Grasas	3.3 <sup>ab</sup>	3.6 <sup>a</sup>	2.7 <sup>ab</sup>	2.8 <sup>ab</sup>	2.3 <sup>b</sup>	2.4 <sup>b</sup>	2.9 <sup>ab</sup>
Fibra cruda	1.5 <sup>c</sup>	1.6 <sup>bc</sup>	1.9 <sup>ab</sup>	1.5 <sup>c</sup>	1.8 <sup>abc</sup>	2.1 <sup>a</sup>	1.5 <sup>c</sup>
Cenizas	3.9 <sup>bc</sup>	4.0 <sup>a</sup>	4.1 <sup>a</sup>	3.9 <sup>c</sup>	4.0 <sup>ab</sup>	4.0 <sup>a</sup>	2.8 <sup>d</sup>
Proteínas	17.6 <sup>ab</sup>	17.5 <sup>b</sup>	17.9 <sup>ab</sup>	17.7 <sup>ab</sup>	18.2 <sup>a</sup>	17.7 <sup>ab</sup>	17.6 <sup>ab</sup>
Carbohidratos	67.9 <sup>bc</sup>	67.1 <sup>c</sup>	68.1 <sup>bc</sup>	68.4 <sup>b</sup>	68.0 <sup>bc</sup>	68.6 <sup>bc</sup>	70.6 <sup>a</sup>

\*Promedios ± error estándar (EE). EE humedad, 0.1; EE grasas, 0.11; EE fibra cruda, 0.18; EE cenizas, 0.07; EE proteínas, 0.02; EE carbohidratos, 0.22. Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ). Carbohidratos fueron calculados por diferencia.

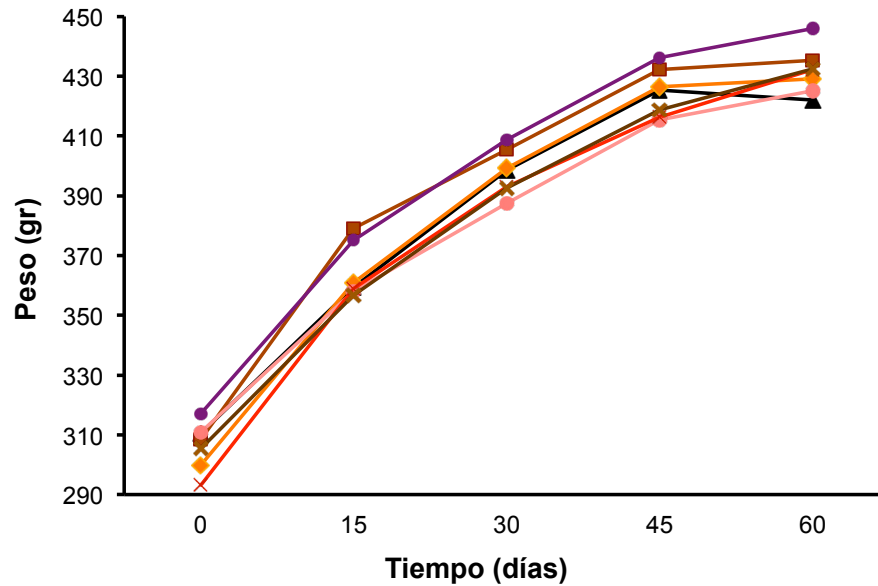
**Tabla 13.** Contenido de fibra dietética insoluble y soluble de las dietas preparadas\*

Tipo de fibra	Dieta 1	Dieta 2	Dieta 3	Dieta 4	Dieta 5	Dieta 6	Dieta control
Soluble (%)	2.4 <sup>ab</sup>	2.0 <sup>ab</sup>	2.5 <sup>a</sup>	1.9 <sup>abc</sup>	0.7 <sup>bc</sup>	1.1 <sup>abc</sup>	0.2 <sup>c</sup>
Insoluble (%)	8.0 <sup>a</sup>	7.4 <sup>a</sup>	7.8 <sup>a</sup>	6.8 <sup>a</sup>	8.9 <sup>a</sup>	10.7 <sup>a</sup>	8.3 <sup>a</sup>
Total (%)	10.4 <sup>a</sup>	9.4 <sup>a</sup>	10.4 <sup>a</sup>	8.6 <sup>a</sup>	9.5 <sup>a</sup>	11.8 <sup>a</sup>	8.5 <sup>a</sup>

\*Promedios ± error estándar (EE). EE fibra soluble, 0.31; EE fibra insoluble, 1.39; EE fibra dietética total, 1.39. Promedios por filas con letras diferentes muestran diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

### Ganancia de peso

Los resultados indicaron que el aumento de peso a través del tiempo, en los diferentes grupos de ratas no resultó significativo ( $P > 0.05$ ), presentándose una tendencia ascendente del incremento de peso, conforme avanzaba el tiempo (Figura 15). Esto se puede explicar debido a que todos los grupos recibieron una dieta balanceada y la misma cantidad de alimento.



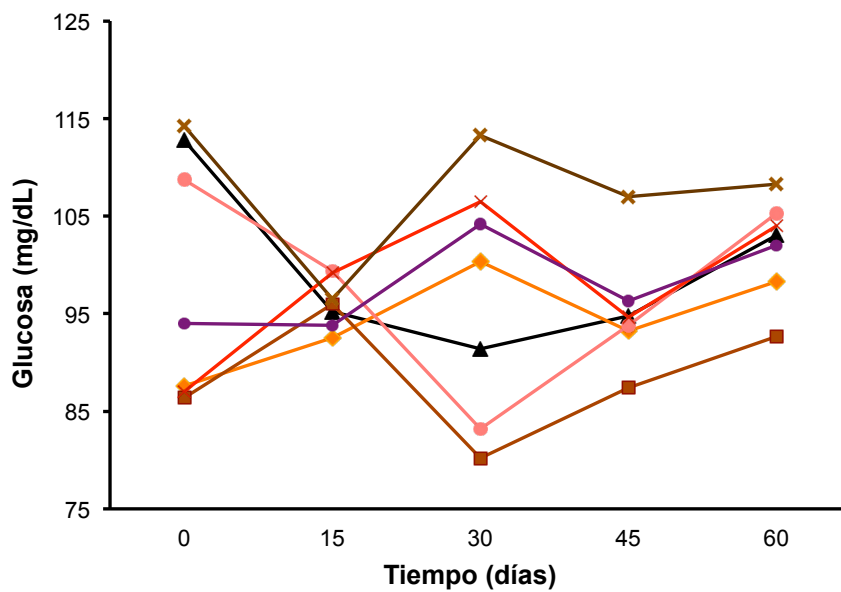
**Figura 15.** Medición del peso corporal a través del tiempo. ▲= Dieta 1<sup>a</sup>, ◆= Dieta 2<sup>a</sup>, ■= Dieta 3<sup>a</sup>, ●= Dieta 4<sup>a</sup>, ×= Dieta 5<sup>a</sup>, ●= Dieta 6<sup>a</sup> y ×= Dieta control<sup>a</sup>. EE, 7.4. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .

## Glucosa

Los efectos de las diferentes dietas preparadas sobre los niveles y el comportamiento de glucosa en sangre resultaron significativos, así como su interacción con el efecto tiempo ( $P < 0.05$ ), debido a la diferente composición y proporción de los ingredientes en cada uno de los tratamientos (Figura 16). Las dietas que destacan en la reducción de glucosa a través del tiempo con respecto a la dieta control, fueron los tratamientos 2, 3 y 4, de los cuáles, la dieta 3 presentó la reducción más significativa (88.4 mg/dL), debido a su alto contenido de fibra soluble (2.5, Tabla 13). La finalidad fisiológica que ejerce la fibra soluble fue identificada como un efecto asociado a la capacidad de generar productos de alta viscosidad a una solución de baja concentración, una propiedad soluble de los polisacáridos de alto peso molecular. Los geles viscosos formados por la fibra en el intestino delgado actúan como una red que, al capturar las moléculas de glucosa y enzimas digestivas como la amilasa, en su paso por el intestino, reducen con esto la digestión de los carbohidratos y la capacidad y velocidad de absorción de la glucosa, previniendo niveles altos de glucosa en sangre (Wood, 2007). Esto concuerda con un estudio realizado por Brennan et al. (2013), que elaboraron productos extrudidos con

adición de fracciones de  $\beta$ -glucanos de cebada y hongos, obteniendo reducciones sustanciales en la respuesta glucémica (hasta 25% en comparación con el producto control). Moya (2008), evaluó el efecto hipoglucemiante de extrudidos hechos a base de avena, salvado y nopal, encontrando que los extrudidos con adición de nopal obtuvieron un índice glucémico más bajo que el control, comprobando el efecto hipoglucemiante del nopal, fuente importante de fibra soluble. En un estudio realizado por Frias y Sgarbieri (1998), donde evaluó el efecto de la adición de goma guar en dietas de ratas Wistar, se encontró una disminución significativa de los niveles de glucosa en sangre, a través del tiempo. En otro estudio, se evaluó el efecto de harina de mango con alto contenido de fibra soluble (6.85%), en ratas Wistar diabéticas, obteniendo una disminución significativa de los niveles de glucosa en sangre al consumir dietas con 5, 10 y 15% de harina de mango (Perpétuo y Salgado 2003). La FDA determinó que en promedio, la cantidad efectiva diaria de la ingesta de fibra soluble es de 3 g (Wood 2007), lo cual nos indica que los cereales extrudidos y a su vez las dietas formuladas son una fuente importante de fibra soluble, aportando en promedio un 1.7% de este tipo de fibra, lo que equivale a un 57% del valor diario recomendado, por lo que los cereales obtenidos se pueden considerar como alimentos altos en fibra soluble, con todos los beneficios que esto conlleva.

Es importante mencionar que hay diversos factores de un alimento que influyen de manera significativa en los niveles de glucosa en sangre, como: la composición de macronutrientes, el procesamiento y métodos de cocción, las características físicas de los hidratos de carbono y la presencia de otros componentes en los alimentos. Un factor que pudo influir en los niveles de glucosa en sangre, fue que los cereales extrudidos presentaron valores de viscosidad muy bajos, según el perfil de viscosidad amilográfica (Figura 6), lo cual indica una menor gelatinización del almidón haciéndolo menos digerible para las enzimas digestivas, provocando menor digestión y absorción de carbohidratos (Najjar et al. 2004)



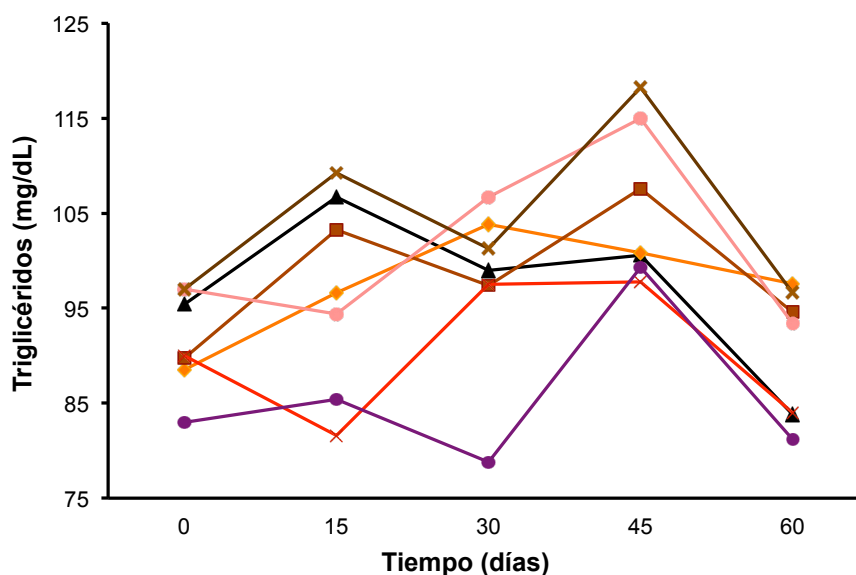
**Figura 16.** Medición de glucosa en sangre a través del tiempo. ▲= Dieta 1<sup>ab</sup>, ◆= Dieta 2<sup>bc</sup>, ■= Dieta 3<sup>c</sup>, ●= Dieta 4<sup>bc</sup>, ×= Dieta 5<sup>ab</sup>, ●= Dieta 6<sup>ab</sup> y ×= Dieta control<sup>a</sup>. EE, 3.8. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .

### Triglicéridos

Los resultados del análisis *in vivo* para la medición de triglicéridos muestran un efecto significativo de las diferentes dietas y del efecto tiempo sobre los niveles sanguíneos de este parámetro en las ratas Wistar ( $P < 0.05$ ) (Figura 17); donde los valores más altos de triglicéridos corresponden para la dieta control con el mayor porcentaje de carbohidratos (70.6%, Tabla 12), esto se puede explicar debido a un mecanismo en el metabolismo de los lípidos que consiste en la síntesis de triglicéridos a partir de hidratos de carbono siempre que exista una cantidad mayor de la que se puede usar de inmediato para obtener energía o almacenarse en forma de glucógeno, en estos casos el exceso se convierte rápidamente en triglicéridos (Guyton y Hall, 1997), tal como se puede observar esta tendencia en la Figura 17. Por otro lado las dietas 5 y 6 presentaron los valores más bajos de triglicéridos sanguíneos (Figura 17), debido a que son las dietas que presentan menores porcentajes de grasa en su composición (Tabla 12). Este efecto también está fuertemente relacionado por el tipo de grasa que contienen los cereales extrudidos y en este caso las dietas formuladas, debido a que contienen ingredientes como la linaza y el amaranto, que son ricos en ácidos grasos poliinsaturados, particularmente en ácido alfa-linolénico (AAL ó ALN como se abrevia algunas veces),



ácido graso esencial omega-3 y el ácido linoléico (AL), ácido graso esencial omega-6. Los cuales son esenciales para los seres humanos, porque deben ser obtenidos de las grasas y aceites de los alimentos debido a que nuestro cuerpo no los produce. Estudios realizados indican que el consumo de ácidos grasos como el omega-3 disminuye el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, indicando que la naturaleza anti aterogénica de compuestos como el ácido graso omega-3 es sobre la base de su inhibición en la síntesis de LDL, de la aceleración para la eliminación de los LDL y la reducción de triglicéridos en suero, agregación plaquetaria y presión arterial (Steffens 1997).



**Figura 17.** Medición de triglicéridos en sangre a través del tiempo. ▲= Dieta 1<sup>ab</sup>, ◆= Dieta 2<sup>ab</sup>, ■= Dieta 3<sup>ab</sup>, ●= Dieta 4<sup>ab</sup>, ×= Dieta 5<sup>bc</sup>, ●= Dieta 6<sup>c</sup> y ×= Dieta control<sup>a</sup>. EE, 5.0. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .

En un estudio realizado por Vijaimohan et al. (2006), se demostró un efecto reductor de lípidos al incluir aceite de linaza en la alimentación de ratas Wistar alimentadas con una dieta hipercolesterolémica. Otro ejemplo del efecto reductor de lípidos sanguíneos gracias a este tipo de ácidos grasos esenciales (omega-3), es el estudio realizado por Wiesenfeld et al. (2003), quienes evaluaron el efecto de una dieta de semillas de linaza y harina de linaza desengrasada sobre los perfiles de ácidos grasos en suero de ratas embarazadas. Estas dietas se dieron durante la gestación, lactancia y ocho semanas

después del destete. Los resultados obtenidos indicaron que en el tratamiento con semillas de linaza los ácidos grasos fueron biodisponibles y metabolizados por las ratas, el ácido linolénico (ALA) y el ácido eicosapentaenoico incrementaron. La dieta con semillas de linaza provocó un mayor cambio en el perfil de ácidos grasos que la dieta con harina de linaza desengrasada. De la misma manera, en este estudio se utilizó la semilla de linaza sin desengrasar, precisamente para obtener el efecto funcional de este tipo de ácidos grasos esenciales (omega-3) sobre los niveles de triglicéridos en sangre. En otro estudio realizado por Sunitha et al. (1997) se evaluó el perfil lipídico en ratas Wistar que consumieron dietas adicionadas con diferentes aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados (omega-3); aceite de cártamo, aceite de girasol y aceite de salvado de arroz, obteniendo una disminución significativa en los niveles de triglicéridos y colesterol.

Otro ingrediente funcional de los cereales extrudidos que puede tener un efecto reductor sobre los niveles de triglicéridos, es la fibra soluble; debido a que estos polisacáridos pueden formar una matriz de gel que puede retrasar la absorción de nutrientes, por la captura de nutrientes, enzimas digestivas, ácidos biliares en la matriz y por la disminución de mezclado y difusión en el intestino. En un modelo *in vitro*, utilizando tubos de diálisis, Johnson y Read (1988), mostraron que la goma de guar parece inhibir la absorción debido a la resistencia a los efectos convectivos de las contracciones intestinales.

Por otro lado el atrapamiento de los ácidos biliares por estos geles provoca una reducción en la absorción de ácidos grasos, debido a que estos influyen de manera muy importante en la digestión y absorción de los triglicéridos. El primer paso en la digestión de las grasas consiste en reducir el tamaño de los glóbulos con el fin de que las enzimas digestivas puedan actuar sobre sus superficies, este proceso se conoce como emulsión y se produce, sobre todo, gracias a la acción de las sales biliares que provocan que los glóbulos grasos se fragmenten con facilidad cuando son agitados en el intestino delgado (Setchell 1988). Por lo tanto, una disminución de la bilis provocaría una emulsión deficiente y por lo tanto una menor capacidad digestiva por parte de las enzimas.

La mayor parte de los triglicéridos de la dieta son degradados por la lipasa pancreática en ácidos grasos libres y 2-monoglicéridos. Sin embargo, la hidrólisis de los triglicéridos es un proceso reversible, por tanto, la acumulación de monoglicéridos y de ácidos grasos libres en la vecindad de las grasas en proceso de digestión bloquea rápidamente el progreso de este último. Las sales biliares desempeñan un papel de gran importancia puesto que separan a los monoglicéridos y a los ácidos grasos libres de la vecindad de los glóbulos que están siendo digeridos. Esto sucede mediante la unión de estos ácidos grasos y monoglicéridos a la porción grasa de micelas formadas por 20 a 40 moléculas de sales biliares, con lo que inmediatamente desciende la concentración de productos finales de la digestión que se encuentran en la vecindad de los glóbulos que están siendo digeridos, y el proceso digestivo puede proseguir sin interrupción (Guyton y Hall 1997). Estas micelas de sales biliares, a su vez, también actúan como medio de transporte de los monoglicéridos y ácidos grasos libres hacia la superficie de las microvellosidades del ribete en cepillo para ser absorbidos. En este lugar, tanto los monoglicéridos como los ácidos grasos se difunden inmediatamente a través de la membrana celular del enterocito hacia su interior. De esta forma, las micelas de sales biliares permanecen en el quimo, hacia donde se difunden de nuevo para absorber más monoglicéridos y ácidos grasos y volver a llevarlos hacia las células epiteliales. Tras penetrar en el enterocito, los ácidos grasos y monoglicéridos son captados por el retículo endoplásmico liso, donde son recombinados para formar nuevos triglicéridos, enseguida se agregan en el aparato de Golgi, formando glóbulos que contienen colesterol y fosfolípidos llamados quilomicrones. El aparato de Golgi los libera y excreta por exocitosis celular hacia los espacios basolaterales que rodean la célula, desde donde pasan a la linfa en el canal linfático central de la vellosidad (Ockner y Isselbacher 1984).

Por lo tanto, las micelas de sales biliares realizan una función transbordadora extraordinariamente importante para la absorción de las grasas. Cuando existen abundantes micelas de sales biliares, la proporción de grasa absorbida alcanza hasta un 97% mientras que en ausencia de estas sales sólo puede absorberse un 40 a 50% (Guyton y Hall 1997); tal como puede ocurrir cuando las sales biliares son atrapadas por los geles viscosos de las fibra solubles en el intestino, provocando una disminución importante de los niveles de triglicéridos sanguíneos. Así mismo, Dole y Murt (1960), indicaron que la

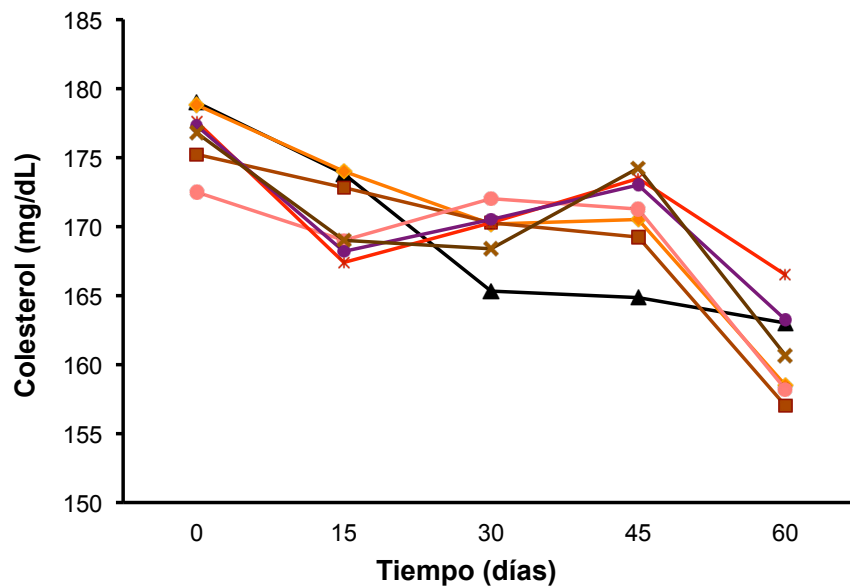
fibra dietética interfiere en la formación de micelas dentro del lumen del intestino o altera la difusión o accesibilidad de los lípidos micelares a la superficie de absorción. Esto concuerda con un estudio realizado por Agarwal y Chauhan (1988), quienes evaluaron el efecto hipolipemiante de dietas con diferentes fuentes vegetales de fibra dietética, en ratas alvinas; observando un incremento significativo de ácidos biliares en las heces de las ratas, con la mayor reducción de los niveles de triglicéridos con la dieta incorporada con la fibra vegetal de una planta llamada Karira (*Capparis decidua*). En otro estudio realizado por Frias y Sgarbieri (1998), donde evaluó el efecto de la adición de goma guar en dietas de ratas Wistar, se observó una reducción significativa de los niveles de triglicéridos en sangre, con niveles de goma guar del 10 y 20%.

### **Colesterol**

Los resultados para la medición de colesterol en sangre no mostraron diferencia significativa entre los diferentes tratamientos ( $P > 0.05$ ), sólo se mostró una diferencia significativa para el factor tiempo (Figura 18). Sin embargo las dietas 1 y 3 con un mayor contenido de fibra soluble (Tabla 13), presentaron los valores más bajo de colesterol, a través del tiempo (Figura 18).

El parámetro de colesterol es más difícil de modificar o alterar, debido a que el organismo cuenta con un mecanismo regulador muy eficaz para controlar los niveles de colesterol sanguíneos. Un aumento de la cantidad de colesterol ingerido todos los días aumenta la concentración plasmática levemente. Sin embargo, cuando se ingiere colesterol, esta concentración inhibe la enzima principal para su síntesis endógena, la reductasa de la 3-hidroxi-metilglutaril CoA, proporcionando así un sistema de control por retroacción intrínseca que evite el aumento excesivo de la concentración plasmática de colesterol. Como resultado de ello, al alterarse la cantidad de colesterol en la dieta la concentración plasmática de colesterol no sufre habitualmente un cambio al alza o a la baja de un  $\pm 15\%$ . Otro factor que afecta la concentración plasmática de colesterol, es una dieta con grasa muy saturada, la cual puede aumentar la concentración sanguínea de colesterol de un 15 a un 25%. Este es el resultado de un aumento del depósito de grasa en el hígado, que proporciona entonces cantidades mayores de acetyl-CoA en las células hepáticas para la producción de colesterol. Por tanto, para reducir la concentración

sanguínea de colesterol es muy importante, mantener una dieta pobre en grasas saturadas como mantener una dieta baja en colesterol (Guyton y Hall 1997). En el caso de este estudio, las ratas no estuvieron sujetas a una dieta alta en colesterol o grasas saturadas, por eso no se pudo observar el efecto significativos de los ingredientes funcionales de los diferentes tratamientos sobre los niveles de colesterol sanguíneos. Otra manera de poder haber visto estos efectos era que las ratas tuvieran un grado de hipercolesterolemia, para poder observar algún tipo de reducción significativa en el colesterol.



**Figura 18.** Medición de colesterol en sangre a través del tiempo. ▲= Dieta 1<sup>a</sup>, ◆= Dieta 2<sup>a</sup>, ■= Dieta 3<sup>a</sup>, ●= Dieta 4<sup>a</sup>, ×= Dieta 5<sup>a</sup>, ●= Dieta 6<sup>a</sup> y ×= Dieta control<sup>a</sup>. EE, 1.8. Medias con letras diferentes representan diferencia significativa mediante la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ .

Por otro lado, la ingestión de ácidos grasos poliinsaturados y fibra dietética, sobre todo soluble, deprime habitualmente la concentración sanguínea de colesterol en una cantidad leve o moderada, por lo que esto también pudo influir en que los niveles de colesterol se mantuvieran estables y dentro de los niveles normales, debido a que los ingredientes funcionales de las dietas preparadas (amaranto y linaza), cuentan con este tipo de ingredientes bioactivos dentro de sus composición. Por ejemplo, en un estudio realizado por Vijaimohan et al. (2006), demostró un efecto reductor de lípidos al incluir aceite de linaza en la alimentación de ratas Wistar que si fueron alimentadas con una dieta

hipercolesterolémica. Plate et al. (2002) demostraron que se obtuvo una reducción del colesterol al alimentar conejos hipercolesterolémicos con bocadillos inflables de amaranto. Nalini y Kapoor (1999), evaluaron el efecto de la alimentación con dietas de polvos secos de nuez de la india, nuez de bedda y grosella en ratas que produjeron hipercolesterolemia mediante una dieta de inducción de hipercolesterolemia; observando una reducción significativa de los niveles de colesterol en sangre. En otro estudio, se incorporó una mezcla de aceite de salvado de arroz, aceite de girasol y aceite de cártamo a una dieta de ratas, alta en colesterol y se evaluó el efecto hipolipemiante de la adición de estos aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados, obteniendo una reducción de los niveles de colesterol y colesterol de lipoproteína de baja densidad (LDL) (Sunitha et al. 1997).

## CONCLUSIONES

Se logró optimizar la formulación de la mezcla de ingredientes y las condiciones del proceso extrusión para obtener un cereal extrudido hecho a base de linaza, amaranto y sémola de maíz. Los diferentes niveles de linaza y amaranto y su interacción en la elaboración de un cereal extrudido instantáneo, impactaron de manera significativa sobre las propiedades fisicoquímicas y los porcentajes de fibra dietética soluble e insoluble. Se obtuvieron cereales extrudidos con alto contenido de proteína ( $> 12\%$ ), mayor al que contienen la mayoría los cereales para desayuno comerciales, y con un porcentaje de grasa saludable ( $< 5\%$ ).

Un ingrediente que se utiliza para la obtención de cereales extrudidos expandibles, es el almidón (sémola de maíz). Se pudo observar que los cereales extrudidos con los niveles de sémola de maíz más bajos y mayores porcentajes de fibra dietética, presentaron una menor viscosidad, una disminución del índice de expansión e IAA y un incremento significativo del ISA, resultando en aglomerados más compactos, con un aumento de la cristalinidad y estructuras laminares más grandes y comprimidas, según el análisis de SEM.

El análisis sensorial muestra que los cereales extrudidos tienen una buena aceptación en cuanto a los atributos de sabor, textura y color en relación con cereales comerciales altos en fibra, y según la prueba de ordenamiento es igual de aceptado que el resto de los cereales extrudidos comerciales cuando es consumido con leche. En lo que se refiere a las cinéticas de absorción en leche todos los tratamientos resultaron con la misma capacidad de retención, debido a que las condiciones de extrusión fueron las mismas para todos los cereales extrudidos. Esto se puede corroborar con el análisis de crujibilidad, característica de porosidad altamente relacionada con la absorción de leche, donde los extrudidos tampoco presentaron una diferencia significativa.

De acuerdo al análisis *in vivo* se pudo observar que la adición de los diferentes cereales extrudidos a las dietas de las ratas tuvo un efecto significativo en los valores de glucosa y lípidos sanguíneos. Los parámetros que presentaron una diferencia significativa entre los diferentes tipos de dieta, fueron la glucosa y triglicéridos en sangre medidos a través del tiempo. Con respecto a la medición de glucosa, la dieta elaborada con el cereal

extrudido de la mezcla 3 presentó la reducción más significativa debido a su alto contenido de fibra soluble. Las dietas elaboradas con los cereales extrudidos 5 y 6, con menor contenido de grasa, presentaron los niveles más bajos de triglicéridos en sangre. Por otro lado, la medición de colesterol no presentó diferencia significativa entre las diferentes dietas evaluadas.

La adición de granos altos en fibra como la linaza (6.9-9.8%) y el amaranto (19.6-34.7%) en cereales extrudidos instantáneos, procesados por extrusión-cocción, permitió obtener un producto de buena calidad nutricional, con propiedades funcionales y con características fisicoquímicas y sensoriales aceptables. El desarrollo de este producto, para consumo humano, es una alternativa que podría derivar en beneficios para la salud, sobre todo para personas con enfermedades crónico-degenerativas como la Diabetes mellitus y enfermedades cardiovasculares, que necesitan controlar sus niveles de glucosa y lípidos sanguíneos.



## BIBLIOGRAFÍA

- Agarwal V, Chauhan B. 1988. A study on composition and hypolipidemic effect of dietary fibre from some plant foods. *Plant Foods for Human Nutrition* 38:189-197.
- Ainsworth P, Ibanoglu S, Plunkett A, Ibanoglu E, Stojceska V. 2007. Effect of brewers spent grain addition and screw speed on the select physical and nutritional properties of an extruded snack. *Journal of Food Engineering* 81:702-209.
- Altan A, McCarthy K, Maskan M. 2008. Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering* 84:231-242.
- Amaya-Guerra C. 2003. Efecto de la fortificación y enriquecimiento de tortillas regulares y de maíz de alta calidad proteica en el desarrollo fisiológico, cerebral y desempeño en el aprendizaje de ratas de laboratorio. Tesis. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- American Dietetic Association. 1999. Position of the American Dietetic Association. Functional foods. *Journal of the American Dietetic Association* 99:1278-1285.
- Anderson R, Conway H, Pfeifer V, Griffin E. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion-cooking. *Cereal Science Today* 14:4-12.
- Anzaldúa A. 1994. La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y práctica. Acribia: Zaragoza, España.
- AOAC. 1998. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (Vol. II). Washington, DC.
- Arai S. 1996. Studies of functional foods in Japan-State of the art. *Bioscience, biotechnology and biochemistry* 60:9-15.
- Arend W, Dayer J. 1995. Inhibition of the production and effects of interleukin-1 and tumor necrosis factor  $\alpha$  in rheumatoid arthritis. *Arthritis & Rheumatology* 38:151-160.
- Bang M, Kim H, Cho Y. 2009. Alterations in the blood glucosa, serum lipids and renal oxidative stress in diabetic rats by supplementation of onion (*Allium cepa* Linn). *Nutrition research and practice* 3:242-246.

- Barcelo-Coblijn G, Murphy E. 2009. Alpha-linolenic acid and its conversion to longer chain n3 fatty acids: benefits for human health and a role in maintaining tissue n3 fatty acids levels. *Progress in Lipid Research* 48:355-374.
- Bathena S, Ali A, Haudenschild C, Latham P, Ranich T, Mohamed A. 2003. Dietary flaxseed meal is more protective than soy protein concentrate against hypertriglyceridemia and steatosis of the liver in an animal model of obesity. *Journal of the American College of Nutrition* 22:157-164.
- Bernard C. 1983. *Introducció a l'estudi de la medicina experimental*. Edicions Científiques Catalanes: Barcelona.
- Berset C. 1989. Color. In: *Extrusion Cooking*, Mercier C, Linko P, Harper J (eds). Am Assoc Cereal chem: St. Paul, pp. 371-385.
- Bhatnagar S, Hanna M. 1994. Extrusion processing conditions for amylose-lipid complexing. *Cereal Chemistry* 71:587-593.
- Blake O. 2006. Effect of molecular and supramolecular characteristics of selected dietary fibers on extrusion expansion. PhD Dissertation. West Lafayette Indiana: Purdue University.
- Bomba A, Nemcova R, Gancarcikova S, Herich R, Pisl J, Revajova V. 2003. The influence of omega-3 polyunsaturated fatty acids (omega-3 pufa) on lactobacilli adhesion to the intestinal mucosa and on immunity in gnotobiotic piglets. *Berliner Und Munchener Tierarztliche Wochenschrift* 116:312-316.
- Brennan M, Derbyshire E, Tiwari B, Brennan C. 2013. Integration of  $\beta$ -glucan fibre rich fractions from barley and mushrooms to form healthy extruded snacks. *Plant Foods Human Nutrition* 68:78-82.
- Brennan M, Derbyshire E, Tiwari B, Brennan C. 2013. Ready-to-eat snack products: the role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. *International Journal of Food Science and Technology* 48:893-902.
- Brennan M, Monro J, Brennan C. 2008. Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration. *International Journal of Food Science and Technology* 43:2278-2288.

- Byars J, Singh M. 2015. Properties of extruded chia-corn meal puffs. *LWT - Food Science and Technology* 62:506-510.
- Camire M, Camire A, Krumhar K. 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Reviews in Food Science and Nutrition* 29:35-57.
- Camire M, Zhao J, Dougherty M, Bushway R. 1995. In vitro binding of benzopyrene by ready-to-eat breakfast cereals. *Cereal Foods World* 40:447-450.
- Carter J. 1993. Potential of flaxseed and flaxseed oil in baked good and other products in human nutrition. *Cereal Foods World* 38:753-759.
- Cervantes R. 2007. Catálogo de propiedades nutrimentales, nutracéuticas y medicinales de amaranto. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla México, Coordinación General de cadenas productivas.
- Chassagne-Berces S, Leither M, Melado A, Barreiro P, Correa E, Blank I. 2011. Effect of fibers and whole grain content on quality attributes of extruded cereals. *Procedia Food Science* 1:17-23.
- Chinnaswamy R, Hanna M. 1991. Physicochemical and macromolecular properties of starch-cellulose fiber extrudates. *Food Structure* 10:229-239.
- Clark R, Johnson S. 2002. Sensory acceptability of foods with added Dupin (*Lupinus angustifolius*) kernel fiber using pre-set criteria. *Journal of Food Science* 67:356-362.
- Clydesdale F. 1999. ILSI North America Technical Committee on Food Components for Health Promotion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 39: 203-316.
- Codex Alimentarius. 2009. Guidelines for use of nutrition and health claims.
- Cueto M, Porrás-Saavedra J, Farroni A, Alamilla-Beltrán L, Schoenlechner R, Schleining G. 2015. Physical and mechanical properties of maize extrudates as affected by the addition of chia and quinoa seeds and antioxidants. *Journal of Food Engineering* 167:139-146.
- Cunnane S, Ganguli S, Menard C, Liede A, Hamadeh M, Chen Z. 1993. High  $\alpha$ -linolenic acid flaxseed (*Linum usitatissimum*): some nutritional properties in humans. *British Journal of Nutrition* 69:443-453.
- Das U. 2006. Biological significance of essential fatty acids. *Journal of the Association of Physicians of India* 54:309-319.

- Daun J, Barthet V, Chornick T, Duguid S. 2003. Structure, composition and variety development of flaxseed. In: Flaxseed in human nutrition, Thompson L, Cunnane S (eds). Champaign Illinois, pp. 1-40
- Dendy D, Dobraszczyk B. 2001. Cereales y Productos Derivados, Química y Tecnología. Acribia: Zaragoza, España.
- DeSesso J, Jacobson C. 2001. Anatomical and physiological parameters affecting gastrointestinal absorption in humans and rats. Food and Chemical Toxicology 39:209-228.
- Ding Q, Ainsworth P, Tucker G, Marson H. 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. Journal of Food Engineering 66:283-289.
- Diplock A, Aggett P, Ashwell M, Bornet F, Fern E, Roberfroid M. 1999. Scientific concepts of functional foods in Europe: consensus document. British Journal of Nutrition 81:S1-S27.
- Djoussé L, Arnett D, Pankow J, Hopkins P, Province M, Ellison R. 2005. Dietary linolenic acid is associated with a lower prevalence of hypertension in the NHLBI family heart study. Hypertension 45:368-373.
- Djoussé L, Hunt S, Amett D, Province M, Eckfeldt J, Ellison R. 2003. Dietary linolenic acids is inversely associated with plasma triacylglycerol: The National Heart, Lung and Blood Institute Family Heart Study. American Journal of Clinical Nutrition 78:1098-1102.
- Dole V, Murt H. 1960. Micro determination of long chain fatty acids in plasma and tissues. Journal of Biological Chemistry 235:2595-2599.
- Egert S, Kannenberg F, Somoza V, Erbersdobler H, Wahrburg V. 2009. Dietary  $\alpha$ -linolenic acid, EPA and DHA have differential effects on LDL fatty acid composition but similar effects on serum lipid profiles in normolipidemic humans. Journal of Nutrition 139:861-868.
- Eisenberg S, Levy R. 1975. Lipoprotein metabolism. Advances in lipid research 13:1-89.

- Esposito F, Arlotti G, Bonifati A, Napolitano A, Vitale D, Fogliano V. 2005. Antioxidant activity and dietary fibre in durum wheat bran by-products. *Food Research International* 38:1167-1173.
- Fennema OR. 2000. *Química de los alimentos*. Acribia: Zaragoza, España.
- Ferrer J, Favre C, Gomis R, Fernández-Novell J, García-Rocha M, de la Iglesia N. 2003. Control of glycogen deposition. *EEBS letters* 546:127-132.
- Fredrickson D, Levy R, Lees R. 1967. Fat transport in lipoproteins-an integrated approach to mechanisms and disorders. *New England Journal of Medicine* 276:34-44.
- Frias A, Sgarbieri V. 1998. Guar gum effects on food intake, blood serum lipids and glucose levels of Wistar rats. *Plant Foods for Human Nutrition* 53:15-28.
- Funk C. 2001. Prostaglandins and leukotrienes: advanced in eicosanoid biology. *Science* 294:1871-1875.
- Gálvez A, Flores I, González A. 2006. Proteínas vegetales. En: *Química de los Alimentos*, Badui S (eds). Pearson educación: Estado de México, pp. 222-227.
- Ganorkar P, Jain R. 2015. Development of flaxseed fortified rice-corn flour blend based extruded product by response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology* 52:5075-5083.
- Ganorkar P, Patel J, Shan V, Rangrej V. 2016. Defatted flaxseed meal incorporated corn-rice flour blend based extruded product by response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology* 53:1867-1877.
- Gonzalez M, Schemmel R, Gray J, Dugan L, Sheffield L, Welsch C. 1991. Effect of dietary fat on growth of MCF-7 and MDAMB231 human breast carcinomas in athymic nude mice: relationship between carcinoma growth and lipid peroxidation product levels. *Carcinogenesis* 12:1231-1235.
- Gualberto D, Bergman C, Kazemzadeh M, Weber C. 1997. Effect of extrusion processing on the soluble and insoluble fiber, phytic acid contents of cereal brans. *Plant Food for Human Nutrition* 51:187-198.
- Guerra-Matías A, Areas J. 2005. Glycemic and insulinemic responses in women consuming extruded amaranth (*Amaranthus cruentus L.*). *Nutrition Research* 25:815-822.

- Guy R. 2001. Selecting the right extruder. In: *Extrusion Cooking Technologies and Applications*, Guy R (eds). Woodhead Publishing Limited: Cambridge, England, pp. 9-15.
- Guyton A, Hall J. 2011. *Tratado de Fisiología Médica*. Elsevier: Barcelona, España, pp. 789-829.
- Harper J. 1981. *Extrusion of Foods (Vol. II)*. CRC Press Inc: Boca Raton, FL, USA.
- Harper J. 1994. Experiencias con extrusión de soya: Potencial futuro, desarrollo, nutrición y mercadeo de productos. *Soya Noticias* 235:5-10.
- Hediger M, Rhoads D. 1994. Molecular physiology of sodium-glucose cotransporters. *Physiological Reviews* 74:993.
- Holguín-Acuña A, Carvajal-Millán E, Santana-Rodríguez V, Rascón-Chu A, Márquez-Escalante J, Ponce de León-Renova N. 2008. Maize bran/oat flour extruded breakfast cereal: A novel source of complex polysaccharides and an antioxidant. *Food Chemistry* 111:654-657.
- Hozova B, Valik L, Zemanowic J. 1997. Sensory evaluation of shelf-stable cereal amaranth-based products during storage. *Food Technology and Biotechnology* 35:133-137.
- Hromádková Z, Ebringerová A, Sasinková V, Šandula J, Hříbalová V, Omelkov J. 2003. Influence of the drying method on the physical properties and immunomodulatory activity of the particulate (1-3)- $\beta$ -D-glucan from *Saccharomyces cerevisiae*. *Carbohydrate Polymers* 51:9-15.
- Hui D, Labonté E, Howles P. 2008. Development and physiological regulation of intestinal lipid absorption. III. Intestinal transporters and cholesterol absorption. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology* 294:G839.
- Huth M, Dongowski G, Gebhardt E, Flamme W. 2000. Functional properties of dietary fibre enriched extrudates from barley. *Journal of Cereal Science* 32:115-128.
- Ilo S, Liu Y, Berghofer E. 1999. Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technolgie* 32:79-88.
- Iqbal J, Hussain M. 2009. Intestinal lipid absorption. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism* 296:E1183.

- James M, Gibson R, Cleland L. 2000. Dietary polyunsaturated fatty acids and inflammatory mediator production. *The American Journal of Clinical Nutrition* 71:343S-348S.
- Jar A. 2014. Bienestar animal y el uso de animales de laboratorio en la experimentación científica. *Revista Argentina de Microbiología* 46:77-79.
- Jin Z, Hsieh F, Huff H. 1994. Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt and sugar. *Cereal Chemistry* 71:227-234.
- Johnson I, Read N. 1988. Do viscous polysaccharides slow absorption by inhibiting diffusion or convection? *European Journal of Clinical Nutrition* 42:307-312.
- Kaletunc G, Breslauer K. 2003. *Characterization of cereals and flours: properties, analysis and applications*. Marcel Dekker Inc: New York, USA.
- Kaur K, Jha A, Sabikhi L, Singh A 2012. Significance of coarse cereals in health and nutrition: a review. *Journal of Food Science and Technology* 51:1429-1441.
- Krebs H. 1948-1949. The tricarboxylic acid cycle. *Harvey Lecture Series* 44:165-199.
- Kremer J. 2000. n-3 fatty acids supplements in rheumatoid arthritis. *The American Journal of Clinical Nutrition* 71:349S-351S.
- LaFollette H, Shanks N. 1994. Animal experimentation: The legacy of Claude Bernard. *Journal Studies in the Philosophy of Science* 8:195-210.
- Lakshmi N, Shobha S, Alavi S, Kalpana K, Soumya M. 2014. Utilization of extrusion technology for the development of millet based complementary foods. *Journal of Food Science and Technology* 51:2845-2850.
- Liu R. 2007. Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science* 46:207-219.
- Loh J, Mannell W. 1990. Application of rheology in the breakfast cereal industry. In: *Dough rheology and baked product texture*. Faridi H, Faubion J (eds). Van Nostrand Reinhold: New York, pp. 405-420.
- Lusas E, Riaz M. 1999. Introduction to extrusion and extrusion principles. In: *Feeds and pet food extrusion manual*. Riaz M (eds). Texas A y M University, College Station, Texas: Food Protein R y D Center.

- Machado M, Oliveira F, Cunha L. 1999. Effect of milk fat and total solid concentrations on the kinetics of moisture uptake by ready-to-eat breakfast cereal. *International Journal of Food Science and Technology* 34:47-57.
- Macmohan B, Godson C. 2004. Lipoxins: endogenous regulators of inflammation. *American Journal of Physiology-Renal Physiology* 286:F189-F201.
- Mälkki Y. 2001. Oat fiber: production, composition, physicochemical properties, physiological effects, safety and food applications. In: *Handbook of dietary fiber*. Sungsoo S, Dreher M (eds). Marcel Dekker Inc: New York, EEUU.
- Mansbach C, Gorelick F. 2007. Development and physiological regulation of intestinal lipid absorption. II. Dietary lipid absorption, complex lipid synthesis, and the intracellular packaging and secretion of chylomicrons. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology* 293:G645.
- McDonald M. 1998. Linaza: Una recopilación sobre sus efectos en la salud y nutrición. Comisión de granos de Canadá, pp.10-21.
- McDonald M, Grahan I, Harvey K, Sinclair A. 1981. Antibacterial activity of hydrolysed linseed oil and linolenic acid against methicillin-resistant staphylococcus aureus. *The Lancet* 2:1056.
- Medrano M. 2007. Elaboración de un cereal extrudido alto en fibra soluble a partir de avena y nopal. Tesis. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Milner J. 2000. Functional foods: the US perspective. *The American Journal of Clinical Nutrition* 71:1654S-1659S.
- Montgomery D. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley.
- Morris D. 2007. *Flax a health and nutrition primer*. Flax Council of Canadá. Winnipeg MB, pp. 9-21
- Moya C. 2008. Efecto hipoglucemiante de un producto extrudido a base de avena, salvado y nopal. Tesis. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Muser F, Van-Lengerich B. 1984. Systems analytical model for the extrusion of starches. In *Thermal processing and quality of foods*. Elsevier Applied Sci. Publ: London, pp. 175-179.



- Najjar N, Adra N, Hwalla N. 2004. Glycemic and insulinemic responses to hot vs cooled potato in males with varied insulin sensitivity. *Nutrition Research* 24:993-1004.
- Nalini D, Kapoor R. 1999. Effect of plant fruits-Indian gall nut, bedda nut and gooseberry-on hypercholesterolemic rats. *Plant Foods for Human Nutrition* 53:343-349.
- National Research Council. 2010. Guide for the care and use of laboratory animals. National Academies Press: Washington DC.
- O'Mahony M. 1990. Sensory evaluation of food. Marcel Dekker: New York, EE.UU.
- Ockner R, Isselbacher K. 1984. Recent concepts of intestinal fat absorption. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology* 71:107.
- OMS. 2003. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases. Technical report.
- Oomah B, Mazza G. 1998. Flaxseed products for disease prevention. In: Functional foods, biochemical and processing aspects, Mazza G (eds). Pub. Co Lancaster: EEUU, pp. 91-138.
- Orlans F. 1993. In the name of science: Issues in responsible animal experimentation. Oxford University Press.
- Patil H, Tiwari R, Repka M. 2016. Hot-Melt Extrusion: from Theory to Application in Pharmaceutical Formulation. *An Official Journal of the American Association of Pharmaceutical Scientists* 17:20-42.
- Pedersen B, Kalinowski L, Eggum B. 1987. The nutritive value of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*): 1. Protein and minerals of raw and processed grain. *Plant Foods for Human Nutrition* 36:309-324.
- Pęksa A, Kita A, Carbonell-Barrachina A, Miedzianka J, Kolniak-Ostek J, Tajner-Czopek A. 2016. Sensory attributes and physicochemical features of corn snacks as affected by different flour types and extrusion conditions. *LWT-Food Science and Technology* 72:26-36.
- Pęksa A, Kita A, Jariene E, Danilcenko H, Gryszkin A, Figiel A. 2016. Amino acid improving and physical qualities of extruded corn snacks using flours made from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*), amaranth (*Amaranthus cruentus L.*) and pumpkin (*Cucurbita maxima L.*). *Journal of Food Quality* 39:580-589.

- Pérez-Lizaur A, Palacios-González B, Castro-Becerra A, Flores-Galicia I. 2014. Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes. Fomento de Nutrición y Salud, AC: México DF.
- Perpétuo G, Salgado J. 2003. Effect of mango (*Mangifera indica, L.*) ingestion on blood glucose levels of normal and diabetic rats. *Plant Foods for Human Nutrition* 58:1-12.
- Plate A, Arêas J. 2002. Cholesterol-lowering effects of extruded amaranth (*Amaranthus caudatus L.*) in hypercholesterolemic rabbits. *Food Chemistry* 76:1-6.
- Pons J, Permanyer-Miralda G, Camí J, Rodés J. 2014. La experimentación animal y el progreso de la medicina. *Medicina Clínica* 143:448-454.
- Rada-Mendoza M, Sanz M, Olano A, Villamiel M. 2004. Study on nonenzymatic browning in cookies, crackers and breakfast cereals by maltulosa and furosine determination. *Food Chemistry* 85:605-609.
- Ragae S, Abdel-Aal E. 2006. Pasting Properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry* 95:9-18.
- Ramos-Diaz J, Suuronen J, Deegan K, Serimaa R, Tuorila H, Jouppila K. 2015. Physical and sensory characteristics of corn-based extruded snacks containing amaranth, quinoa and kañiwa flour. *LWT-Food Science and Technology* 64:1047-1056.
- Ridges L, Sunderland R, Moerman K, Meyer B, Astheimer L, Howe P. 2001. Cholesterol lowering benefits of soy and linseed enriched foods. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition* 10:204-211.
- Robin F, Schuchmann H, Palzer S. 2012. Dietary fiber in extruded cereals: limitations and opportunities. *Trends in Food Science and Technology* 28:23-32.
- Rodriguez-Leyva D, Weighell W, Edel A, LaVallee R, Dibrov E, Pinneker R. 2013. Potent antihypertensive action of dietary flaxseed in hypertensive patients. *Hypertension* 62:1081-1089.
- Rowan A. 1997. The benefits and ethics of animal research. *Scientific American-American Edition* 276:79-93.
- Ruiz-Gutiérrez M, Quintero-Ramos A, Meléndez-Pizarro C, Talamás-Abbud R, Barnard J, Márquez-Meléndez R. 2012. Nixtamalization in two steps with different

- calcium salts and the relationship with chemical, texture and thermal properties in masa and tortillas. *Journal of Food Process Engineering* 35: 772-783.
- Ruiz B. 1991. Algunos conceptos de la fibra y su utilización en la nutrición de aves. *Soya Noticias* 226:14-17.
- Ryu G, Neumann P, Walker C. 1993. Effects of some baking ingredients on physical and structural properties of wheat flour extrudates. *Cereal Chemistry* 70:291-297.
- Sacchetti G, Pittia P, Pinnavaia G. 2005. Effect of extrusion temperature and drying-tempering on both the kinetics of hydration and the textural changes in extruded ready-to-eat breakfast cereals during soaking in semi-skimmed milk. *International Journal of Food Science and Technology* 40:655-663.
- Saini A, Harjai K, Mohan H, Punia R, Chhibbers S. 2010. Long-term flaxseed oil supplementation diet protects BALB/c mice against *Streptococcus pneumoniae* infection. *Medical Microbiology and Immunology* 199:27-34.
- Sánchez-Madriral M, Melendez-Pizarro C, Martínez-Bustos F, Ruiz-Gutierrez M, Quintero-Ramos A, Márquez-Melendez R. 2013. Structural, functional, thermal and rheological properties of nixtamalised and extruded blue maize (*Zea mays* L.) flour with different calcium sources. *International Journal of Food Science and Technology* 49:578-586.
- Santillán-Moreno A, Martínez-Bustos F, Castaño-Tostado E, Amaya-Llano S. 2011. Physicochemical characterization of extruded blends of corn starch-whey protein concentrate-agave tequilana fiber. *Food and Bioprocess Technology* 4:797-808.
- Senior A. 1988. ATP synthesis by oxidative phosphorylation. *Physiological reviews* 68:177.
- Setchell K. 1988. *The Bile Acids*. Plenum Publishing Corp: New York.
- Setchell K, Kritchevsky D, Nair P. 2012. *The Bile Acids: Chemistry, Physiology and Metabolism*. Springer Science & Business Media.
- Shakir K, Madhusudan B. 2007. Hypocholesterolemic and hepatoprotective effects of flaxseed chutney: evidence from animal studies. *Indian Journal of Clinical Biochemistry* 22:117-121.
- Sharma P, Gujral H, Rosell C. 2011. Effects of roasting on barley  $\beta$ -glucan, thermal, textural and pasting properties. *Journal of Cereal Science* 53:25-30.

- Simpolous A. 2011. Evolutionary aspects of diet: the omega-6/omega-3 ratio and the brain. *Molecular Neurobiology* 44:203-215.
- Sloan E. 1999. The new market: foods for the not-so-healthy. *Food Technology* 53:54-60.
- Steffens W. 1997. Effects of variation in essential fatty acids in fish feeds on nutritive value of freshwater fish for humans. *Aquaculture* 151:97-119.
- Stulnig T. 2003. Immunomodulation by polyunsaturated fatty acids: mechanisms and effects. *International Archives of Allergy Immunology* 132:310-321.
- Sunitha T, Manorama R, Rukmin C. 1997. Lipid profile of rats fed blends of rice bran oil in combination with sunflower and safflower oil. *Plants foods for Human Nutrition* 51:219-230.
- Takeuchi H, Sakurai C, Noda R, Sekine S, Murano Y, Wanaka K. 2007. Antihypertensive effect and safety of dietary alpha-linolenic acid in subjects with high-normal blood pressure and mild hypertension. *Journal of Oleo Science* 56:347-360.
- Thompson L. 1993. Potential health benefits and problems associated with antinutrients in foods. *Food Research International* 26:131-149.
- Thompson L, Rickard S, Orcheson L, Seidl M. 1996. Flaxseed and its lignan and its oil components reduce mammary tumor growth at a late stage of carcinogenesis. *Carcinogenesis* 17:1373-1376.
- Tolkachev O, Zhuchenko A. 2000. Biologically active substances of flax: medicinal and nutritional properties (a review). *Pharmaceutical Chemistry Journal* 34:360-367.
- Tosi E, Ré E, Lucero H, Masciarelli R. 2001. Dietary fiber obtained from amaranth (*Amaranthus Cruentus*) grain by differential milling. *Food Chemistry* 73:441-443.
- Tosi E, Ré E, Lucero H, Masciarelli R, Sánchez C, De la Torre M. 2002. Whole and defatted hyperproteic amaranth flours tested as wheat flour supplementation in mold breads. *Lebensmittel-Wissenschaft and-Technologie* 35:472-475.
- Vadukapuram N, Hall III C, Tulbek M, Niehaus M. 2014. Physicochemical properties of flaxseed fortified extruded bean snack. *International Journal of Food Science* 2014:1-8.

- Valls Porta A. 1993. El proceso de extrusión en cereales y habas de soja I. Efecto de la extrusión sobre la utilización de nutrientes. IX Curso de Especialización FEDNA. Barcelona, España.
- Vijaimohan K, Jainu M, Sabitha K, Subramaniyam S, Anandhan C, Shyamala. 2006. Beneficial effects of alpha-linolenic acid rich flaxseed oil on growth performance and hepatic cholesterol metabolism in high fat diet fed rats. *Life Science* 79:448-454.
- Wall R, Shani M. 2008. Are Animal models as good as we think? *Therigenology* 69:2-9.
- Wang S, Kim Y. 1998. The effect of protein and fiber on the kinetics of starch gelatinization and melting in waxy corn flour. *Starch/Starke* 50:419-423.
- West S, Krick A, Klein L, Zhao G, Wojtowicz T, McGuinness M. 2010. Effects of diets high in walnuts and flaxoil on hemodynamic responses to stress and vascular endothelial function. *Journal of the American College of Nutrition* 29:595-603.
- Wheeler T, Hinkle P. 1985. The glucose transporter of mammalian cells. *Annual Review of Physiology* 47:503-517.
- Wiesenfeld P, Babu U, Collins T, Sprando R, O'Donnell M, Flym T. 2003. Flaxseed increased alpha-linolenic and eicosapentaenoic acid and decreased arachidonic acid in serum and tissues of rat dams and offspring. *Food and Chemical Toxicology* 41:841-855.
- Wood P. 2007. Cereals beta-glucans in diet and health. *Journal of Cereal Science* 46:230-238.
- Wu W, Huff H, Hsieh F. 2007. Processing and properties of extruded flaxseed-corn puff. *Journal of Food Processing and Preservation* 31:211-226.
- Yao N, White P, Alavi S. 2011. Impact of beta-glucan and other oat flour components on physico-chemical and sensory properties of extruded oat cereals. *International Journal of Food Science and Technology* 46:651-660.
- Zapotoczny P, Markowski M, Majewska K, Ratajski A, Konopko H. 2006. Effect of temperature on the physical, functional and mechanical characteristics of hot-air-puffed amaranth seeds. *Journal of food engineering* 76:269-476.
- Zhang M, Bai X, Zhang Z. 2011. Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran. *Journal of Cereal Science* 54:98-103.

**Anexo 1. Formatos de evaluación para el grado de satisfacción**

**GRADO DE SATISFACCIÓN: ESCALA HEDÓNICA  
ATRIBUTO DE SABOR**

Fecha: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_

Pruebe las muestras de cereal que se le presentan a continuación e indique **según la escala** la calificación para cada una de ellas, evaluando el atributo de sabor.

**Muestra**

**Calificación**

705

\_\_\_\_\_

158

\_\_\_\_\_

342

\_\_\_\_\_



1. Muy malo



2. Malo



3. Regular



4. Bueno



5. Muy bueno

**Comentarios:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**¡MUCHAS GRACIAS!**

**GRADO DE SATISFACCIÓN: ESCALA HEDÓNICA  
ATRIBUTO DE TEXTURA (CRUJIBILIDAD)**

Fecha: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_

Pruebe las muestras de cereal que se le presentan a continuación e indique **según la escala** la calificación para cada una de ellas, evaluando el atributo de textura (crujibilidad).

**Muestra**                      **Calificación**

705                              \_\_\_\_\_

158                              \_\_\_\_\_

342                              \_\_\_\_\_



1. Muy malo



2. Malo



3. Regular



4. Bueno



5. Muy bueno

**Comentarios:**

---

---

---

---

**¡MUCHAS GRACIAS!**

**GRADO DE SATISFACCIÓN: ESCALA HEDÓNICA**  
**ATRIBUTO DE COLOR**

Fecha: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_

Pruebe las muestras de cereal que se le presentan a continuación e indique **según la escala** la calificación para cada una de ellas, evaluando el atributo de color.

Muestra	Calificación
---------	--------------

705	_____
-----	-------

158	_____
-----	-------

342	_____
-----	-------



1. Muy malo



2. Malo



3. Regular



4. Bueno



5. Muy bueno

**Comentarios:**

---

---

---

---

**¡MUCHAS GRACIAS!**



**Anexo 2. Formatos de evaluación para el grado de preferencia**

**PRUEBA DE PREFERENCIA: ORDENAMIENTO**

**PRODUCTO: CEREAL SIN LECHE**

Fecha: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_

Tiene ante usted tres muestras diferentes, deguste adecuadamente cada una de ellas y enseguida ordene las muestras según el grado de preferencia, de las más preferida (=1), a la menos preferida (=3).

Indique sus respuestas a continuación:

**MUESTRA**

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

**Comentarios:**

---

---

---

---

**¡MUCHAS GRACIAS!**

**PRUEBA DE PREFERENCIA: ORDENAMIENTO**

**PRODUCTO: CEREAL CON LECHE**

Fecha: \_\_\_\_\_

Nombre:

\_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_

Tiene ante usted tres muestras diferentes, deguste adecuadamente cada una de ellas y enseguida ordene las muestras según el grado de preferencia, de la más preferida (=1), a la menos preferida (=3).

Indique sus respuestas a continuación:

**MUESTRA**

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

**Comentarios:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**¡MUCHAS GRACIAS!**

## **RESUMEN BIOGRÁFICO**

Jazmin Leticia Tobias Espinoza

Candidato para el grado de

Doctor en Ciencias con Acentuación en Alimentos

Tesis: EFECTO DE LA ADICIÓN DE LINAZA Y AMARANTO EN EL DESARROLLO DE UN CEREAL EXTRUDIDO INSTANTÁNEO Y SU EVALUACIÓN FUNCIONAL MEDIANTE UN MODELO *IN VIVO*

Campo de Estudio: Ciencias de los Alimentos

Datos Personales: Nacida en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, el 5 de octubre de 1982, hija de Benjamín Tobias Morales y María Leticia Espinoza Morales.

Educación: Egresada de la Universidad Autónoma de Chihuahua, obteniendo el grado de Licenciatura en Nutrición en 2006, obteniendo el primer lugar de la generación con un promedio de 9.59. Realizó la Maestría en Ciencias en Tecnología de Alimentos en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (2007-2009), obteniendo el grado con mención honorífica.

Experiencia Profesional: Cuenta con más de 5 años de experiencia en el área de calidad, higiene y nutrición dentro de empresas del ramo alimenticio. Ha sido catedrático de La Universidad La Salle Chihuahua desde el año 2010 donde ha participado en varios proyectos relacionados con el desarrollo tecnológico y científico en el área de alimentos.