



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EXTRUSIÓN EN ALIMENTOS: MATERIAS PRIMAS Y SU EFECTO EN EL  
PROCESO**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUÍMICA FARMACÉUTICA BIÓLOGA  
(TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS)**

**PRESENTA**

**GLORIA NIEVES ACEVEDO OSORIO**



**CDMX**

**AÑO 2020.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: OLGA DEL CARMEN VELAZQUEZ MADRAZO**

**VOCAL: ARTURO NAVARRO OCAÑA**

**SECRETARIO: GLORIA DÍAZ RUIZ**

**1er. SUPLENTE: ARMANDO CONCA TORRES**

**2° SUPLENTE: HIRAM FERNANDO RAMIREZ CAHERO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO 324 DEL DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA, EDIFICIO E, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA.**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**DRA. GLORIA DÍAZ RUIZ**

**SUSTENTANTE:**

---

**GLORIA NIEVES ACEVEDO OSORIO**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</b>                                      | <b>1</b>  |
| <b>RESUMEN</b>  | <b>2</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | <b>3</b>  |
| <b>OBJETIVO GENERAL</b>   | <b>5</b>  |
| <b>OBJETIVOS PARTICULARES</b>                                       | <b>5</b>  |
| <b>METODOLOGÍA</b>  | <b>6</b>  |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO 1. CEREALES Y LEGUMINOSA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN</b> | <b>7</b>  |
| <br>  |           |
| <b>1.1. MORFOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL GRANO</b>                       | <b>7</b>  |
| <b>1.2. MAÍZ</b>  | <b>8</b>  |
| <b>1.3. TRIGO</b>   | <b>10</b> |
| <b>1.4. ARROZ</b>   | <b>11</b> |
| <b>1.5. SORGO</b>   | <b>13</b> |
| <b>1.6. SOYA</b>  | <b>14</b> |
| <b>1.7. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS CEREALES Y LEGUMINOSA</b>        | <b>15</b> |
| <b>1.8. CARBOHIDRATOS</b>   | <b>17</b> |
| <b>1.9. PROTEÍNA</b>  | <b>18</b> |
| <b>1.10. LÍPIDOS</b>  | <b>19</b> |
| <b>1.11. MINERALES, VITAMINAS Y FIBRA CRUDA</b>                     | <b>20</b> |
| <b>1.12. VALOR NUTRITIVO</b>  | <b>20</b> |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 1.13.                                   | CLASIFICACIÓN  | 21        |
| 1.14.                                   | PRODUCCIÓN   | 23        |
| <b>CAPÍTULO 2. PROCESO DE EXTRUSIÓN</b> |  | <b>26</b> |
| 2.1.                                    | EXTRUSIÓN EN ALIMENTOS   | 27        |
| 2.2.                                    | CLASIFICACIÓN DE EXTRUSORES (ENFRIAMIENTO Y TRATAMIENTO TÉRMICO) | 27        |
| 2.2.1.                                  | ISOTÉRMICO   | 27        |
| 2.2.2.                                  | AUTÓGENO   | 28        |
| 2.2.3.                                  | POLITRÓPICO  | 29        |
| 2.3.                                    | CLASIFICACIÓN DE EXTRUSORES POR CONFIGURACIÓN DE TORNILLO        | 29        |
| 2.3.1.                                  | EXTRUSORES DE UN SOLO TORNILLO                                   | 30        |
| 2.3.2.                                  | EXTRUSORES DE DOBLE TORNILLO                                     | 31        |
| 2.3.3.                                  | CO EXTRUSIÓN   | 33        |
| 2.4.                                    | ZONAS Y FUNCIONES OPERATIVAS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN            | 35        |
| 2.4.1.                                  | ZONA DE ALIMENTACIÓN   | 36        |
| 2.4.2.                                  | ZONA DE COMPRESIÓN   | 36        |
| 2.4.3.                                  | ZONA DE FUSIÓN Y PLASTIFICACIÓN                                  | 37        |
| 2.4.4.                                  | VELOCIDAD DEL TORNILLO   | 37        |
| 2.4.5.                                  | TERMOPARES   | 38        |
| 2.4.6.                                  | TEMPERATURA DE LAS CHAQUETAS DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN             | 38        |
| 2.4.7.                                  | TIEMPO DE RESIDENCIA O DE RETENCIÓN                              | 38        |
| 2.4.8.                                  | PRESIÓN  | 38        |
| 2.4.9.                                  | CORTE Y MEZCLA   | 39        |
| 2.4.10.                                 | FORMA Y TAMAÑO DE DADOS  | 39        |
| 2.4.11.                                 | CORTADOR   | 39        |
| 2.4.12.                                 | SECADO   | 40        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 3. EFECTO Y PROPIEDADES DE LAS MATERIAS PRIMAS EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN</b>            | <b>41</b> |
| <b>3.1. POLÍMEROS EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS</b>                                       | <b>41</b> |
| 3.1.1. TIPOS DE ALMIDÓN  | 42        |
| 3.1.1.1. ALMIDÓN Y ALMIDÓN MODIFICADO  | 42        |
| 3.1.2. PROTEÍNA  | 43        |
| 3.1.3. CELULOSA  | 45        |
| <b>3.2. CAMBIOS FÍSICOS EN LAS MATERIAS PRIMAS</b>   | <b>45</b> |
| 3.2.1. TAMAÑO DE PARTÍCULA   | 45        |
| 3.2.2. DENSIDAD DEL PRODUCTO EXTRUDIDO   | 46        |
| 3.2.3. VISCOSIDAD  | 46        |
| 3.2.4. EXPANSIÓN   | 47        |
| <b>3.3. MATERIAS PRIMAS</b>  | <b>47</b> |
| 3.3.1. ARROZ   | 47        |
| 3.3.2. MAÍZ  | 48        |
| 3.3.3. TRIGO   | 48        |
| 3.3.4. LEGUMINOSAS   | 49        |
| <b>3.4. ADITIVOS</b>   | <b>49</b> |
| 3.4.1. COLOR   | 49        |
| 3.4.2. SABORES   | 50        |
| <b>CAPÍTULO 4. PRODUCTOS EXTRUDIDOS EN ALIMENTOS</b>   | <b>52</b> |
| <b>4.1. VALOR NUTRICIONAL EN LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS ALIMENTICIOS</b>                               | <b>52</b> |
| <b>4.2. PROCESOS PARA LA ELABORACIÓN DE PRODUCTOS EXTRUDIDOS</b>                                     | <b>53</b> |
| 4.2.1. PROCESO DE ELABORACIÓN DE CEREAL EXPANDIDO DE MÁIZ PARA DESAYUNO EN FORMA DE ESFERA Y HOJUELA | 53        |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| 4.2.2.       | SNACKS   | 57 |
| 4.2.3.       | PASTA  | 59 |
| 4.2.4.       | ALMOHADAS CON RELLENO                                | 61 |
| 4.2.5.       | CONFITERÍA   | 63 |
| 4.2.6.       | ENCAPSULACIÓN  | 69 |
| 4.3.         | EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS | 70 |
| 4.3.1.       | DENSIDAD APARENTE                                    | 71 |
| 4.3.2.       | INDICE DE EXPANSIÓN                                  | 71 |
| 4.3.3.       | INDICE DE SOLUBILIDAD Y ABSORCIÓN DE AGUA            | 72 |
| 4.3.4.       | SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS                | 73 |
| 5.           | REGULACIÓN DE EXTRUDIDOS                             | 73 |
| CONCLUSIONES |  | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA |  | 76 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
| <b>Figura 1.</b>  | <b>Grano entero</b>   | <b>8</b>  |
| <b>Figura 2.</b>  | <b>Maíz entero</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Figura 3.</b>  | <b>Trigo</b>  | <b>11</b> |
| <b>Figura 4.</b>  | <b>Arroz</b>  | <b>12</b> |
| <b>Figura 5.</b>  | <b>Sorgo</b>  | <b>13</b> |
| <b>Figura 6.</b>  | <b>Soya</b>   | <b>15</b> |
| <b>Figura 7.</b>  | <b>Producción, utilización y existencias de cereales</b>                      | <b>23</b> |
| <b>Figura 8.</b>  | <b>Extrusor isotérmico</b>  | <b>28</b> |
| <b>Figura 9.</b>  | <b>Extrusor autógeno</b>  | <b>28</b> |
| <b>Figura 10.</b> | <b>Extrusor con las condiciones isotérmicas y autógenos</b>                   | <b>29</b> |
| <b>Figura 11.</b> | <b>Extrusor de tornillo sencillo con componentes de flujo de arrastre</b>     | <b>30</b> |
| <b>Figura 12.</b> | <b>Doble tornillo de equipo extrusor</b>                                      | <b>32</b> |
| <b>Figura 13.</b> | <b>Extrusor de doble tornillo co-rotación</b>                                 | <b>33</b> |
| <b>Figura 14.</b> | <b>Cortador con un par de rodillos que prepara productos coextrudidos</b>     | <b>34</b> |
| <b>Figura 15.</b> | <b>El llenado de coextrudidos</b>   | <b>34</b> |
| <b>Figura 16.</b> | <b>Equipo de extrusión</b>  | <b>35</b> |
| <b>Figura 17.</b> | <b>Diferentes muestras de cereales para desayuno recubiertos y expandidos</b> | <b>53</b> |
| <b>Figura 18.</b> | <b>Hojuelas de cereal</b>   | <b>56</b> |

|                   |  |           |
|-------------------|--|-----------|
| <b>Figura 19.</b> | <b>Línea de cereal de extrudido de maíz equipada con un extrusor de doble tornillo</b> | <b>56</b> |
| <b>Figura 20.</b> | <b>Snacks</b>  | <b>57</b> |
| <b>Figura 21.</b> | <b>Formas de snacks</b>  | <b>59</b> |
| <b>Figura 22.</b> | <b>Pasta lista para su consumo</b>   | <b>61</b> |
| <b>Figura 23.</b> | <b>Muestras de almohadas rellenas</b>  | <b>61</b> |
| <b>Figura 24</b>  | <b>Extrusión de caramelos duros</b>  | <b>64</b> |
| <b>Figura 25.</b> | <b>Productos de confitería procesados por extrusión</b>                                | <b>64</b> |
| <b>Figura 26.</b> | <b>Proceso continuo de elaboración de gomitas por extrusión</b>                        | <b>67</b> |
| <b>Figura 27.</b> | <b>Gomitas extrudidas</b>  | <b>68</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS Y DIAGRAMAS

|                    |   |           |
|--------------------|---|-----------|
| <b>Tabla 1.</b>    | <b>Ejemplos de algunos cereales y leguminosas, composición química proximal</b> | <b>17</b> |
| <b>Tabla 2.</b>    | <b>Superficie sembrada nacional, diciembre 2019</b>                             | <b>25</b> |
| <b>Tabla 3.</b>    | <b>Polisacáridos y su fuente de origen</b>                                      | <b>41</b> |
| <b>Diagrama 1.</b> | <b>Proceso para la elaboración de esferas a base de cereal</b>                  | <b>54</b> |
| <b>Diagrama 2.</b> | <b>Proceso para la elaboración de hojuelas a base de cereal</b>                 | <b>55</b> |
| <b>Diagrama 3.</b> | <b>Proceso para la elaboración de snacks</b>                                    | <b>58</b> |
| <b>Diagrama 4.</b> | <b>Proceso para la elaboración de pasta tipo espagueti</b>                      | <b>60</b> |
| <b>Diagrama 5.</b> | <b>Proceso para la elaboración de almohadas rellenas</b>                        | <b>62</b> |
| <b>Diagrama 6.</b> | <b>Proceso para la elaboración de caramelos</b>                                 | <b>65</b> |
| <b>Diagrama 7.</b> | <b>Proceso para la elaboración de gomitas</b>                                   | <b>66</b> |

## **ABREVIATURAS Y SIMBOLOS**

**FAO** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

**DOF** Diario Oficial de la Federación.

**HTST** Alta temperatura, corto tiempo.

**mm** milímetros.

**A.C.** Antes de cristo.

**EE. UU.** Estados Unidos.

**SAGARPA** Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

## RESUMEN

La extrusión es la operación del moldeado de un plástico o material parecido a una pasta, que pasa a través de un cilindro y/o troquel. Durante el proceso de extrusión el material es forzado a fluir en un cilindro y se combinan diversas operaciones unitarias: mezclado, cizallamiento, cocción, amasado y moldeado (Perrot *et al.*, 2012).

Existen diferentes tipos de extrusores: extrusión en frío, extrusor de tornillo de rosca, extrusor de un solo tornillo y de doble tornillo. La extrusión en frío y la térmica son las más aplicadas para la elaboración de alimentos, está última es una de las más importantes, ya que a partir de las materias primas que contienen proteína y almidón se generan: la gelatinización, dextrinación de gránulos de almidón, la desnaturalización de las proteínas, inactivación de enzimas entre otros cambios (Emin *et al.*, 2016).

La industria alimentaria ha incrementado en los últimos años el uso del proceso de extrusión y ha encontrado ventajas de eficiencia y versatilidad, se pueden combinar materias primas que contienen proteína y almidón, así como variar condiciones de proceso para obtener una gran variedad de productos: cereales, botanas, proteínas, texturizados, alimentos instantáneos, dietas para peces, alimentos para animales entre otros (Bouvier y Campanella, 2014).

El objetivo del presente trabajo monográfico de actualización es exponer la información más relevante obtenida de fuentes diversas como artículos de divulgación e investigación, así como libros que describan el proceso de extrusión y los equipos utilizados, y la influencia de las materias primas en el proceso y en los productos alimenticios obtenidos.

## INTRODUCCIÓN

Hacia finales de 1930 se presentaron los primeros equipos de extrusión de un solo tornillo, en 1940 esos mismos extrusores mostraron una productividad alta aplicando en el equipo altas temperaturas, lo que permitió reducir tiempo de proceso y conservar las características sensoriales y nutricionales, en comparación con otros procesos de cocción y formación de alimentos. Los extrusores de doble tornillo para alimentos se introdujeron en la década de 1970, ampliando el alcance de la elaboración de los diferentes productos de alimentos (Bauser *et al.*, 2006).

La extrusión de alimentos es un proceso cada vez más importante y ampliamente aplicado en la industria y al mismo tiempo un tema de investigación científica y de ingeniería industrial, en los últimos años la extrusión en alimentos se ha utilizado para elaborar una amplia variedad de productos alimenticios como cereales para desayuno, pastas, alimentos infantiles, pulpas, texturizados, confitería, alimentos para mascotas, entre otros. Las principales materias primas utilizadas son harinas de cereales y almidones, así como aditivos opcionales azúcares, aromatizantes, colorantes y grasas. Las materias primas y el agua son premezcladas y alimentadas en el equipo extrusor (Roos *et al.*, 2017).

El almidón es el polisacárido más importante sometido a proceso de extrusión no sólo en forma de materia prima, sino también como granos enteros de cereales. El almidón se usa en el proceso de extrusión, no sólo en la industria alimentaria, sino también en los sectores de la industria como papel, película y material de embalaje.

Otra área de aplicación es en el campo de las fibras dietéticas, obtenidas a través de procesamiento de extrusión de subproductos o productos de desecho de la industria alimentaria. La cocción por extrusión también se ha utilizado para la texturización de materiales proteínicos de origen vegetal, para producir estructuras similares a la carne. Recientemente la extrusión se ha aplicado al desarrollo de películas biodegradables, nanocompuestos con características de barrera (Yanniotis *et al.*, 2013).

Desde la perspectiva científica el proceso de extrusión ha impulsado la investigación en áreas como el estudio de fluidos, reología, y reacciones químicas. Las variables de proceso de extrusión, la combinación de mecanismos como la transferencia de calor, cizallamiento, mezclado, compresión, reacciones químicas, texturización, expansión y formación en toda la operación se han considerado para el diseño de nuevos equipos de extrusión (Roos *et al.*, 2017).

Otra área importante en los procesos de extrusión es la encapsulación de componentes funcionales hidrofóbicos, la matriz utilizada es el almidón. Se utiliza para controlar las propiedades importantes del producto extrudido como la estabilidad, intensidad de color, la liberación de las sustancias bioactivas, morfología de la fase dispersa (gotitas de aceite), distribución del tamaño, carga, características interfaciales y estado físico (Eroski consumer, 2006).

La seguridad y estabilidad de los alimentos extrudidos depende del proceso térmico HTST; la extrusión se debe considerar como uno de los procesos eficientes de estabilización de alimentos. El perfil de tiempo-temperatura de la extrusión es suficiente para la inactivación de la mayoría enzimas. Lo mismo es cierto para los microorganismos y sus esporas (Emin *et al.*, 2016).

**OBJETIVO GENERAL:**

Realizar una recopilación a partir de un análisis de la literatura del proceso de extrusión y los equipos utilizados, así como evaluar la influencia de las materias primas en el proceso y en los productos alimenticios obtenidos.

**OBJETIVOS PARTICULARES:**

- Comprender el proceso de extrusión y describir los principales equipos utilizados.
- Conocer las materias primas que pueden utilizarse en la extrusión de alimentos.
- Entender el efecto y la influencia de las materias primas en el proceso de extrusión.
- Proporcionar información acerca de algunos productos comerciales extrudidos.

## **METODOLOGÍA**

Se estableció el tema y los puntos a investigar, se procedió a seleccionar y recopilar información bibliográfica en artículos publicados de revistas especializadas y libros. También se consideraron publicaciones de organismos nacionales e internacionales como: CODEX ALIMENTARIUS, SAGARPA, FAO, Secretaría de economía (Normas Oficiales y Normas Mexicanas). En cada capítulo se realizó una síntesis de investigación facilitando el estudio del trabajo.

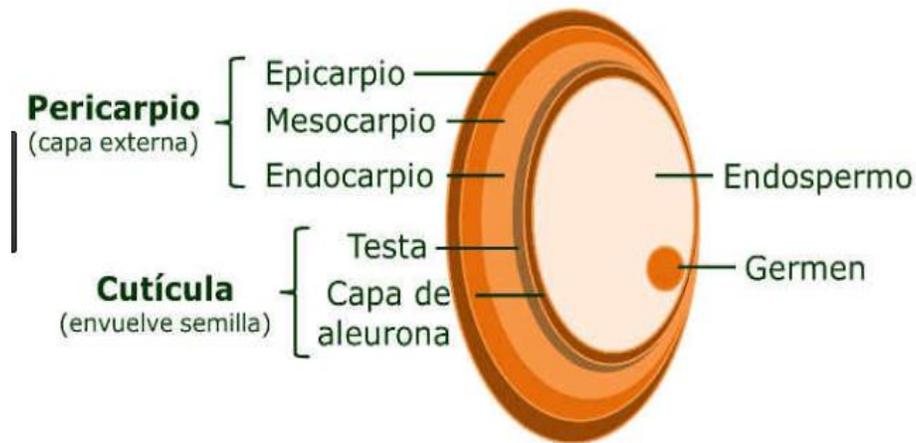
# CAPÍTULO 1

## CEREALES Y LEGUMINOSA UTILIZADOS EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Los cereales están compuestos de carbohidratos, proteínas, lípidos, vitaminas y sales minerales, son clasificados como alimentos almidonosos por que contienen más del 60% de almidón. El almidón se compone de unidades de glucosa y después de la digestión proporciona la mayor parte de energía, que consumen los seres humanos, además de su aporte nutricional. El almidón tiene propiedades funcionales para el procesamiento de cereales, la mayor parte a partir de su gelatinización parcial o total. Los segundos componentes químicos de importancia son las fracciones de proteína distribuidas en diferentes partes del grano, en el endospermo del trigo, cebada y centeno se encuentra el gluten conformado por gliadina y glutenina, en el germen están las albúminas y globulinas. En otros granos como el maíz y el sorgo la mayor cantidad de proteína se encuentra en el germen (42.5% y 20.8% respectivamente) y la menor cantidad se encuentra en el pericarpio (3% y 7% respectivamente) (Gil, 2010).

### 1.1. MORFOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL GRANO

Los granos de cereales se subdividen en tres partes: pericarpio, endospermo y germen, la proporción varía con el tipo de cereal, en general constituyen 7 – 10, 82-85 y 3-10% respectivamente (figura 1). Algunos cereales como avena, arroz y cebada retienen glumas (envolturas florales) después de la cosecha, son denominados granos cubiertos o revestidos, el resto de los cereales pierden glumas (lema y palea) durante las operaciones de recolección y cosecha; se les denomina granos desnudos. Se ha modificado la estructura y apariencia de los cereales por programas de fitomejoramiento. Por ejemplo, hay endospermos de durezas distintas, consecuencia de la proporción de las fracciones vítreas y amorfas del almidón, diferentes colores, grosores del pericarpio, tipos del almidón y tamaños del grano (Wrigley *et al.*, 2016).



**Figura 1.** Grano entero (Botanical-online. 2019).

Los cereales son una fuente importante de nutrientes para la humanidad, los diferentes géneros y especies están adaptados para producirse en la mayoría de los ecosistemas del mundo. Se encuentran en todos los continentes desde Argentina a Canadá, desde el nivel del mar hasta en montañas muy altas. Algunos cereales se siembran en zonas tropicales, subtropicales, templadas y semidesérticas así como en regiones de África (Ramos, 2013).

## 1.2. MAÍZ

El maíz (*Zea mays L. ssp mays*) tiene evidencias de 7000 años de antigüedad, las cuales fueron encontradas en el Valle de Tehuacán (México). En 1984 fue hallada una mazorca en la cueva Guila Naquitz en Oaxaca, México, fechada en 4250 A.C. Existen otros centros de origen secundarios en América. De acuerdo a investigaciones, el maíz se derivó del teosintle (*Zea mays ssp parviglumis* y Mexicana). En las civilizaciones maya y azteca fue importante con fines ceremoniales y como alimento. El maíz por su genética, compatibilidad sexual y entrecruzamiento originó híbridos fértiles. El maíz tiene el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día (León y Rosell, 2007).

Los polisacáridos, las proteínas y los lípidos representan los tres componentes principales del grano de maíz. Un grano de maíz típico está compuesto de 70-75% de almidón, 8-10% de proteína, 4-5% de lípidos, 1-3% de azúcar y 1-4% de cenizas (figura 2). La aceptación del maíz como cultivo se debe principalmente a sus diversas funcionalidades como fuente de alimento. Los granos se pueden usar para la producción de harina, pan (tortillas, arepa), refrigerios, gachas, productos al vapor, bebidas alcohólicas (cerveza) y no alcohólicas, y cereales para el desayuno (copos de maíz). Se han realizado estudios de investigación para aumentar la información de los cambios futuros en el clima que afectarán los rendimientos de maíz. Esto ayudará a determinar las funciones que el maíz podría jugar en términos de seguridad alimentaria. La fertilización de híbridos de maíz de una variedad con polen procedente de otra variedad característica refuerza la primera variedad, posteriormente se han desarrollado híbridos de doble cruzamiento en los que el polen de un híbrido se cruzó con otro híbrido para dar origen a un maíz superior. Recientes avances en genética y en biología molecular han dado como resultado la obtención de híbridos de maíz transgénicos (Bonavia, 2013).



**Figura 2.** Maíz entero (Jucha, 2019).

### 1.3. TRIGO

El trigo se encontró carbonizado hace 6700 años en un lugar llamado Jarmo. El trigo, *Triticum spp*, cuyo significado es quebrado triturado o trillado y hace referencia al proceso que se sigue para separarlo de la cascarilla, se designa a los cereales cultivados y silvestres de las plantas de la familia *Poaceae* (gramínea), dicho cultivo se extendió por todo el mundo. Las especies *Triticum monocum* y *T. turgidum* proceden de Siria, Turquía, Irán y Jordania; *T. durum* de Asia central; *T. timopheevi* de Mesopotamia; *T. aestivum* de medio oriente, Rusia y región del mar Caspio; así como Asia Menor (Serna, 2013). Fue introducido a México por los españoles en el año 1520, posteriormente llevado a las demás colonias. Una ventaja de los trigos antiguos es que retienen su cascarilla, que protege al grano maduro del ataque de los insectos y se elimina antes del procesamiento del grano. A los granos actuales esta cascarilla se trilla fácilmente durante la cosecha. La planta de trigo en general crece a temperaturas entre los 10 y 25°C, no requiere una humedad excesiva y crece en zonas con precipitaciones anuales entre 375 y 800 mm. El trigo de hábito invernal, crece desde 15 a 60° de latitud norte y de 24 a 40° de latitud sur (Juárez, *et al.*, 2014).

Los trigos que se cosechan en otoño son conocidos como trigo de ciclo largo, los trigos de ciclo corto se siembran en primavera, estos tienen rendimientos menores que los trigos de invierno que presentan la ventaja de tener mayor contenido de gluten y fuerza proteica. La dureza del trigo está relacionada con la forma en la que el endospermo se rompe y es lo que le otorga la calidad harinera, ya que, a mayor dureza, mayor es el contenido proteico. Los trigos duros producen una harina con granulometría amplia, los trigos blandos producen una granulometría fina. En México se produce trigo en Chihuahua, Guanajuato y la región del Bajío, así como en Sonora y el norte de Sinaloa (figura 3). En contraste con los otros granos de cereal, el trigo posee las proteínas únicas del gluten capaces de formar la masa completamente viscoelástica requerida para producir pasta, fideos y productos horneados con levadura, especialmente pan. Además, los derivados de trigo como la malta de trigo, la harina y el almidón se usan comúnmente como adyuvantes en

la industria cervecera. El trigo también proporciona aminoácidos esenciales, vitaminas, minerales, fitoquímicos beneficiosos y componentes de fibra dietética a la dieta humana, especialmente cuando se consumen productos integrales. A pesar de su importante papel en la dieta humana, los alimentos a base de trigo presentan problemas de salud para una minoría de personas debido, en particular, a la intolerancia al trigo y la alergia, como la enfermedad celíaca y el asma del panadero, respectivamente. Para satisfacer la demanda futura prevista de trigo, se requieren mejoras en la productividad del trigo a través de un plan eficiente de mejoramiento de trigo e innovaciones en la gestión de cultivos (Arendt y Zannini., 2013).



**Figura 3.** Trigo (Circuito productivo, 2018).

#### **1.4. ARROZ**

El arroz (*sativa*) es considerado una planta sagrada en Asia de la familia *Poaceae* (gramínea), hay evidencias arqueológicas que describen que el arroz fue plantado y utilizado antes de 4,000 años A. C. Hay aproximadamente 20 especies de género *Oryza*. Hacia el año 8000 a.c. *Oryza sativa L* se aclimató en el cercano oriente, los árabes lo difundieron en Siria, Egipto y norte de África. En el siglo VII se introdujo en España, se extendió por Júcar, Portugal, después se propago a Italia y a

mediados del siglo XVI en Francia y posteriormente en todos los continentes (figura 4) (Pincirolí, 2010).

El arroz (*Oryza sativa L.*) es el alimento básico de casi dos tercios de la población mundial, tiene el menor contenido de proteína de todos los cereales; sin embargo, la proteína de arroz es altamente nutritiva y tiene uno de los mayores contenidos de lisina entre los cereales, es rico en almidón, bajo en fibra y no tiene niveles detectables de vitaminas A, C o D, se consume en forma de fideos, arroz inflado, arroz dulce fermentado y refrigerios producidos por extrusión (cocción). Se utiliza para hacer productos de panadería, salsas, alimentos infantiles, cereales para el desayuno, bebidas alcohólicas y vinagre. El continuo crecimiento de la población y el aumento del consumo de arroz significarán que la demanda mundial de arroz se ampliará significativamente en el futuro cercano. Un enfoque integrado que involucre prácticas agrícolas más eficientes y ambientalmente sostenibles, el manejo de plagas y el desarrollo de nuevas variedades de arroz adaptadas a las condiciones agrícolas específicas de cada país adecuadas para un clima cambiante.

En el cultivo de arroz han sido empleadas hibridaciones artificiales, la inducción de mutaciones o el cultivo *in vitro*, modificando el genoma de arroz se han obtenido organismos genéticamente modificados (OGM) (Manickavassagan *et al.*, 2017).



**Figura 4.** Arroz (Telemadrid, 2014).

## 1.5. SORGO

El sorgo (*Sorghum bicolor*) se originó en la región ecuatorial de África donde se ha cultivado por más de 2,000 años; es un cultivo tradicional en África e India. El sorgo pertenece a la familia *Poaceae* (Gramínea), subfamilia *Panicoideae* es resistente a la sequía y a las altas temperaturas (figura 5) (Carrasco *et al.*, 2011).

Es un cultivo importante en los EE. UU., India, Argentina, México, África, China y Australia. El sorgo es visto como una materia prima atractiva para los productos sin trigo / gluten, debido al sabor neutral y el color de variedades específicas, su baja alergenicidad y su capacidad para crecer en condiciones de sequía. También es una fuente importante de nutraceuticos debido a su alto contenido de compuestos fenólicos antioxidantes. El sorgo se utiliza para producir una amplia gama de productos alimenticios, como productos de grano entero, panes y panqueques, albóndigas y cuscús, gachas, pasteles, galletas, pasta, sancochado, bocadillos y cervezas. Se podrían desarrollar nuevos mercados interesantes para el sorgo mediante la producción de nuevos alimentos funcionales que contengan polifenoles antioxidantes o el uso de sorgo para desarrollar nuevas bebidas probióticas sin lactosa (De León, 2012).



**Figura 5.** Sorgo (Traxco, 2018).

## 1.6. SOYA

La soya (*Glycine max* (L) Merr es una leguminosa (figura 6) que pertenece a la subfamilia *papilionáceas*. Las primeras citas de los granos de soya, datan entre 2838 y 2883 a. C., es un grano sagrado para los chinos junto con el arroz, trigo, la cebada y el maíz. A finales del siglo XV fue introducida en Europa, en 1765 se introdujo a América (Georgia, EE.UU.) desde China. Estados Unidos, Brasil, Argentina e India son países que actualmente lideran la producción del grano (FAO, 2005). Debido a las plagas que acaban con los cultivos, se han realizado modificaciones genéticas de los granos de soya, en el 2016 el Comité Europeo aprobó el cultivo y distribución de soya transgénica en Europa, existiendo tres variedades: La soya “RR” (*Roundup Ready*), la soya Bt derivada de *Bacillus thuringiensis* y soya productora de aceite modificado, las cuales fueron patentadas por Monsanto, en México tiene demandas por plantación ilegal. No se ha comprobado que cause daño el uso de cultivos transgénicos y se producen principalmente en Europa (Alimentos transgénicos, 2020).

La soya contiene un alto porcentaje de proteína, el cual se puede comparar con el de la carne, además su precio es menor, ya que el kilo de soya texturizada para sustituir carne está en \$33.00/Kg, mientras que el costo de la carne de res es de \$160.00/Kg actualmente. Los granos de soya pueden ser consumidos por el ser humano, la mayoría son triturados para la producción de harina de soya junto con el aceite vegetal y subproductos como la lecitina de soya utilizado como emulsionante natural, la harina se utiliza principalmente como forraje animal y el aceite de soya se utiliza en diversos alimentos, como las papas fritas comerciales (Stolton y Dudley, 2014).



**Figura 6.** Soya (UrosPoteko, 2018).

### **1.7. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS CEREALES Y LEGUMINOSA.**

Los cereales se componen de carbohidratos, proteínas, lípidos, vitaminas y minerales. Los cereales se clasifican como alimentos almidonosos, ya que contienen más del 60% de almidón. Dicha macromolécula, está conformada por unidades de glucosa y proporciona gran parte de la energía consumida por la humanidad. Además de su aporte nutricional, el almidón provee de propiedades funcionales para el procesamiento de los cereales dirigido hacia la gelatinización del almidón produciendo masas viscosas, geles o suspensiones. Además del almidón hay azúcares solubles como: glucosa, fructosa, sacarosa y maltosa (Serna, 2013).

Los segundos componentes abundantes en los cereales son las fracciones de proteína distribuidas en las diferentes partes del grano. Las proteínas se clasificaron en 1907 por Osborne con base en su solubilidad; las albúminas son solubles en soluciones salinas, permaneciendo solubles frente al agua, las globulinas son solubilizadas por soluciones salinas, las cuales precipitan por diálisis frente al agua, estas dos proteínas se encuentran en las células más externas del endospermo, aleurona y germen. Las proteínas insolubles, como las prolaminas y glutelinas constituyen la reserva proteica de los cereales (contenido elevado del 70 al 80%). Las prolaminas se solubilizan en disoluciones de metanol al 70% y las glutelinas en disoluciones de ácidos o álcalis débiles o bien agentes disociantes. Sólo el gluten

de trigo proporciona propiedades viscoelásticas cuando la masa se hidrata y se mezcla. Las proteínas tienen buena tasa de digestibilidad, en los cereales se comprende del 99.7% de digestibilidad, el arroz el 77%, para el trigo y el maíz el 95%; así como el sorgo del 85%; sin embargo, en general, son deficientes del aminoácido limitante que es la lisina, seguido del triptófano, como en el maíz. Los cereales también son conocidos por ser ricos en ácido aspártico y ácido glutámico; así como por la presencia de asparagina, glutamina, prolina y leucina (Wrigley *et al.*, 2016).

En general, los cereales contienen minerales y vitaminas en la estructura del pericarpio, germen, capa de aleurona: Calcio, fósforo, potasio, sodio, magnesio, hierro, cobalto, cobre, manganeso, zinc, tiamina, riboflavina, niacina, piridoxina, pantoténico, biotina, folacina y ácido fólico, el cual presenta actividad antinutricional, debido a su capacidad de formar complejos insolubles con minerales y proteínas, convirtiéndolos en no digeribles para el ser humano. Los minerales también están asociados con las glumas (Martínez *et al.*, 2002).

La composición química proximal de la fibra cruda varía de acuerdo al tipo de cereal. Las glumas, pericarpio y las paredes celulares son ricos en fibra. En el arroz palay, café y blanco varía entre 0.2 - 2.1%, avena en grano entero o desnuda entre 1- 14.3 y en la cebada entre 5.3-5.9% (Gil, 2010).

Respecto a la fibra dietética se clasifica en soluble e insoluble, la fracción insoluble formada por celulosa y hemicelulosa, se localiza en las envolturas del grano (lema y palea) y en el pericarpio. La fibra soluble también se encuentra en las paredes celulares y está formada principalmente de hemicelulosa, arabinosilanos, y  $\beta$ -glucanos, este tipo de fibra se encuentra principalmente en la avena y la cebada. El arroz, avena y cebada tienen un alto contenido de fibra cruda.

En la **Tabla 1**, se presenta la composición química proximal de algunos cereales y leguminosa. La proteína se analizó por el método Kjeldahl, el factor de conversión de nitrógeno a proteína utilizado en trigo es, 5.75, en arroz es 5.95 y el resto de cereales 6.25, el porcentaje de nitrógeno en proteína es de 17.4%, 16.8% y 16% respectivamente. El extracto etéreo está formado por aceite y compuestos

liposolubles, la fracción lipídica contiene nutrientes y compuestos con beneficios para la salud, por lo que se consideran nutraceuticos (Grijalva *et al.*, 2016).

**Tabla 1. Ejemplos de algunos cereales y leguminosa, composición química proximal<sup>a</sup> (Tabla modificada de Serna, 2013 y Badui, 2013)**

| Cereal           | Proteína (%) | Extracto Etéreo (%) | Fibra Cruda (%) | Cenizas (%) | ELN <sup>b</sup> (%) |
|------------------|--------------|---------------------|-----------------|-------------|----------------------|
| Trigo (Panadero) | 11.5-17.0    | 1.8-2.8             | 2.8-3.0         | 1.8-2.0     | 75.2-82.1            |
| Arroz (Blanco)   | 7.3-8.3      | 0.3-0.6             | 0.2-0.6         | 0.3-0.9     | 89.6-91.9            |
| Maíz (Dentado)   | 8.1-11.5     | 3.9-5.8             | 2.4-3.5         | 1.4-2.0     | 77.2-84.2            |
| Sorgo            | 7.3-15.6     | 0.5-5.2             | 1.2-6.6         | 1.1-4.5     | 68.1-89.9            |
| Soya             | 40.0         | 21.0                | 1.0-2.0         | 4.9         | 34.0                 |

<sup>a</sup> Valores expresados en materia seca, el número indica valor promedio.

<sup>b</sup> Extracto libre de nitrógeno

## 1.8. CARBOHIDRATOS

Aproximadamente el 80% del grano se compone de carbohidratos y se encuentran distribuidos en las diferentes estructuras del grano. Entre 3 y 5% son estructurales, conformados por una fracción fibrosa y el resto constituido principalmente por almidón que se almacena en gránulos dentro del endospermo. El maíz, sorgo, trigo, centeno y triticale contienen un alto porcentaje de almidón, aproximadamente el 75%. El almidón es un polímero conformado por moléculas de amilosa y amilopectina. La amilosa se encuentra unida por medio de los enlaces glucosídicos  $\alpha$ - 1,4 y forma cadenas lineales; la amilopectina es un almidón ramificado conformado por enlaces  $\alpha$ - 1,6. (Eliasson, 2006).

En general, el almidón de la mayoría de los cereales contiene aproximadamente 75% de amilopectina y 25% de amilosa. Las moléculas de almidón nativo conformadas por amilosa y amilopectina muestran cristalinidad, cuando se observa bajo microscopio equipado con filtros polarizados, se observa la presencia de una cruz de malta o birrefringencia, la cual indica que el gránulo de almidón no tiene

daños. Se considera que esta gelatinizado cuando contiene un exceso de agua y se aplica un tratamiento térmico y es irreversible porque hay pérdida de la estructura cristalina interna en el gránulo. La mayoría de los gránulos de almidón pierde birrefringencia cuando se aplican temperaturas entre 68- 78°C (Cabezas *et al.*, 2017).

Los cereales que han sido genéticamente modificados como el maíz, trigo, arroz, cebada y sorgo pueden contener entre 95% y hasta 100% de amilopectina. A estos cereales se les denomina cerosos. También hay mutantes de maíz con alto contenido de amilosa (aprox. 40-50%) ambos tipos de cereal se utilizan para la industria. Los cereales maduros contienen aproximadamente 2% de monosacáridos, disacáridos y oligosacáridos, estos azúcares se encuentran en el germen principalmente, los principales azúcares solubles presentes en los cereales son la maltosa, glucosa, maltotriosa y dextrinas lineales y ramificadas (Plaza *et al.*, 2013).

## **1.9. PROTEÍNA**

La cantidad de proteína difiere en los diferentes cereales, debido al genotipo y condiciones ambientales que se presentan durante el desarrollo y maduración del grano en el campo, en todos los tejidos del grano se encuentran los compuestos proteicos, el germen y la capa de aleurona concentran la mayor cantidad de compuestos nitrogenados (Cheung y Metha, 2015).

La avena y el arroz son los cereales con los contenidos más altos y más bajos de proteína, respectivamente. Entre las diferentes clases de trigo, el contenido de proteína es variable de acuerdo con la clase (suave o duro), los trigos suaves se han seleccionado por su bajo contenido de proteína (8.0-12.0 %), por el contrario, el trigo duro contiene más proteína (10.5 y 14 %). En general, en el maíz, sorgo, trigo, centeno y triticale el contenido de proteína varía entre 8 y 16% (Hettiarachchy *et al.*, 2012).

Las proteínas se clasifican de acuerdo a su solubilidad: hidrosolubles (albúminas) y solubles en solución iónica débil (globulinas). Las albúminas y globulinas conforman las nucleoproteínas y glucoproteínas que se encuentran principalmente en el germen y tienen un mejor balance de aminoácidos. En la mayoría de los cereales la fracción proteica más abundante es la prolamina, localizada en el endospermo; es insoluble en agua y soluble en alcohol (Hernández *et al.*, 2015).

En el trigo cuando la gliadina es hidratada y sometida a una acción mecánica presenta propiedades de elasticidad y distensión, utilizadas para la elaboración de pan, galletas etc. Las glutelinas son las principales proteínas estructurales del endospermo, situadas en la matriz proteica y asociadas a las prolaminas (Quilca *et al.*, 2018).

#### **1.10. LÍPIDOS**

Los cereales contienen pequeñas cantidades de lípidos en el germen, se dividen en polares y no polares, los no polares son los triglicéridos y constituyen más del 95% de la fracción lipídica, los polares son los fosfolípidos y glucolípidos, los cuales están presentes en mínimas cantidades. La avena es el cereal con mayor contenido de lípidos, en menor proporción se encuentran el mijo perla, el maíz y el sorgo. El contenido de lípidos en los cereales es importante para los procesos de alimentos, en la vida de anaquel y para mejorar las características sensoriales de los productos elaborados (Kaczmarek *et al.*, 2015).

### **1.11. MINERALES, VITAMINAS Y FIBRA CRUDA**

Los cereales son una fuente importante de algunos minerales y están asociados con glumas, pericarpio y capa de aleurona. En general, el contenido de calcio es bajo, solamente el mijo presenta un mayor contenido. El endospermo tiene un contenido bajo de minerales y fibra cruda. En general el fósforo es el macromineral encontrado en todos los cereales que se asocia con el ácido fítico, el cual se encuentra en la capa de aleurona. El maíz es el único cereal que contiene 80% de ácido fítico encontrado en el germen. También los cereales son una fuente importante de potasio. Los microminerales hierro, zinc y cobre se encuentran en el pericarpio, germen y capa de aleurona. Los cereales pierden minerales, principalmente del pericarpio durante el proceso de molienda, como es el caso del arroz y del trigo. Los cereales son particularmente ricos en vitamina B como tiamina (B<sub>1</sub>), riboflavina (B<sub>2</sub>), niacina (B<sub>3</sub>), ácido pantoténico (B<sub>5</sub>), piridoxina (B<sub>6</sub>), biotina (B<sub>7</sub>) y ácido fólico. Las vitaminas están concentradas en las células de la capa de aleurona que contienen más del 80% de niacina en el trigo. El germen y la capa de aleurona son las principales fuentes de vitamina E en la forma de tocoferoles y tocotrienoles (Ahmed *et al.*, 2014).

### **1.12. VALOR NUTRITIVO**

Los cereales proveen la mayoría de los nutrientes, los cuales constituyen una fuente de energía digestible o calorías, poseen una cantidad y calidad de fibra para el buen funcionamiento gastrointestinal. Los cereales contienen baja calidad proteica, la lisina es limitada, el valor proteico nutricional de los cereales es mejorado cuando una dieta se complementa con leguminosas, un ejemplo son los frijoles o la soya (Ortega *et al.*, 2015).

A partir de los productos de cereales, la aportación promedio al ser humano es de 55% de calorías y 48% de proteínas. El almidón se digiere casi completamente y ayuda en el control de diabetes. Los cereales integrales son una buena fuente de

fibra dietética que ayuda al funcionamiento del tracto gastrointestinal, reduce la energía, el colesterol y la glucosa en sangre (Sarwar *et al.*, 2013).

El principal inconveniente es que tienen una baja calidad de proteína y su contenido esta entre 8 y 12 % y su digestibilidad se encuentra entre 80 y 90%. Hay programas de mejoramiento de la proteína de maíz, también sobre la obtención de genotipos que contienen vitamina B y A con propiedades nutraceuticas, compuestos fenolicos, antocianinas, taninos (Apraéz *et al.*, 2017).

En las operaciones de molienda, fermentación, malteado y al aplicar elevadas temperaturas se afecta la composición y biodisponibilidad de nutrientes. La mayoría de los productos a base de cereales pasan por la operación de molienda, por lo anterior se utiliza el enriquecimiento para prevenir deficiencias de micronutrientes y evitar el desarrollo de las enfermedades como beriberi, anemia, cretinismo y pelagra. Por otro lado, en los cereales que se procesan térmicamente, se afecta la biodisponibilidad del almidón, proteínas y micronutrientes. El tratamiento térmico gelatiniza el almidón y disminuye la energía que se digiere. La fibra dietética soluble, fermenta y llega al intestino grueso (Martínez *et al.*, 2015).

### **1.13. CLASIFICACIÓN**

Uno de los sistemas de clasificación de los cereales más elaborados y utilizados en los mercados de exportación es el de Estados Unidos, el cual utiliza el grado y la clase para asignar la calidad de los mismos. El grado se refiere a la determinación de la condición del grano y la clase se relaciona con el uso industrial y funcionalidad. En países subdesarrollados generalmente no existe un sistema oficial de clasificación, solo se utilizan pruebas de humedad e inspección visual, en los mercados de exportación se comparan las propiedades de peso hectolítrico, peso del grano, densidad ( $\text{g/cm}^3$ ). En algunos cereales como es el trigo, se tienen varios sistemas de clasificación: el más conocido es de Estados Unidos. Son asignados seis grados de acuerdo al peso hectolítrico, granos dañados totales, granos dañados por calor, granos chupados, quebrados y contaminados. A mayor grado

del grano mejor calidad. Destacan siete clases de trigo entre el durum, cristalino, duros y suaves. Los trigos que se clasifican en Estados Unidos con base a sus propiedades de funcionalidad del gluten son: clase duro-invernal, duro blanco, duro rojo primaveral, suave rojo invernal y suave – blanco. El trigo que se utiliza para la operación de extrusión es el occidental antes mencionado. Con él se elaboran cereales para desayuno, productos integrales y harinas para pastelería, etc. Por otro lado, mediante la operación de extrusión en frío se producen pastas largas y cortas a partir de trigo durum con endospermo vítreo, los cuales contienen entre 10 y 17% de proteína (Lifeder, 2020).

El arroz se canaliza para el consumo humano y se consume después del proceso de descascarado, decorticación y pulido, generalmente se clasifica de acuerdo a su tamaño en largo, medio y corto. Los criterios que se consideran para evaluar su calidad son: peso hectolítrico, porcentaje de grano con endospermo harinoso y color (FAO Y OMS, 2007).

En otra clasificación se describe el arroz, newtrex, toro, japonico, hindú, ceroso, basmati y negro. Un ejemplo es el arroz toro mencionado con un contenido de amilosa entre 18-20% y tiene propiedades de textura semejante a los arroces medianos y cortos. Por otro lado, en Estados Unidos, la condición y clase del grano de maíz se relacionan con el uso industrial, funcionalidad y se clasifica de acuerdo a la forma de la cariósida. Con base en las propiedades físicas y funcionales se obtiene el maíz amarillo, blanco, azul, morado, dentado, cristalino, palomero, ceroso, alto en amilosa, alto en lisina, alto en aceite y pozolero casero. Los tipos de maíz que se utilizan en la operación de extrusión es el blanco con un bajo contenido de carotenoides en el endospermo, canalizado la mayor parte en la industria productora de harinas, botanas y pan. El maíz azul y morado con endospermo blanco y suave con alto contenido de pigmentación en la capa de aleurona, se utiliza para la elaboración de botanas y platillos típicos; el maíz mutante con alto contenido de amilosa, hasta del 50%, se utiliza para la elaboración de cereales de desayuno y botanas (Serna, 2013).

## 1.14. PRODUCCIÓN

De acuerdo a las estimaciones de la FAO (Figura 7), la producción mundial de cereales en 2019 ascendió a 2 719 millones de toneladas. La producción mundial de arroz en 2019 alcanzó los 512 millones de toneladas, lo que representa 0.5 % menos que en 2018. La estimación sobre la producción de trigo en 2019 se mantuvo prácticamente invariable en 763 millones de toneladas, esto es, un 4,2 % más que en 2018. México es el principal productor de trigo de América Central (ONU, 2019; FAO, 2020).



**Figura 7.** Producción, utilización y existencias de cereales (FAO, 2020).

México es el segundo productor de maíz en América Latina y tiene la necesidad de importar el grano, Brasil es uno de los mayores productores. Los países con mayor cosecha de maíz son: China, Unión Europea, Brasil; mientras que los países con producción significativa fueron: México, India, Indonesia, África del sur, y las Islas Filipinas. La FAO proyectó que las importaciones de maíz de México para el ciclo

2018-19 alcanzarían un récord de 16.7 millones de toneladas, 900 mil toneladas más que en el período 2017-18 (ONU, 2020).

En cuanto a las importaciones de soya en México, provinieron de Estados Unidos (90.28%) y Paraguay (6.70%). México es el tercer importador a nivel mundial del 2.88% del total de soya que se comercializa a nivel mundial. Para el sorgo en el año 2017 se obtuvieron resultados que posicionaron a México en cuarto lugar de producción de este cereal. En la actualidad se satisface el 60.60% de los requerimientos nacionales con una producción interna para alimentos balanceados de consumo pecuario (SAGARPA, 2017).

En el año de 2019, la siembra de los cereales ha sido variada en diferentes estados de la República como se muestra en la Tabla 2, el maíz es el cereal con más hectáreas sembradas (708,708) mientras que la soya se sembró en una superficie menor (SIAP, 2019).

**Tabla 2. Superficie sembrada nacional, diciembre 2019 (SIAP, 2019)**

| ESTADO \ CEREAL     | MAÍZ                     | TRIGO   | ARROZ | SORGO   | SOYA |
|---------------------|--------------------------|---------|-------|---------|------|
|                     | Superficie sembrada (ha) |         |       |         |      |
| Baja california     | -                        | 5,518   | -     | -       | -    |
| Baja california Sur | 2,939                    | 8       | -     | 124     | -    |
| Campeche            | 12,110                   | -       | 3,700 | 17,857  | -    |
| Coahuila            | -                        | 2,866   | -     | -       | -    |
| Colima              | 1,120                    | -       | -     | 13      | -    |
| Chiapas             | 86,192                   | 21      | -     | 3006    | 122  |
| Chihuahua           | 21                       | 46      | -     | -       | -    |
| Durango             | -                        | 910     | -     | -       | -    |
| Guanajuato          | -                        | 15,721  | -     | -       | -    |
| Guerrero            | 1,506                    | -       | -     | 11      | -    |
| Hidalgo             | -                        | 268     | -     | -       | -    |
| Jalisco             | 1,194                    | 10,590  | 39    | 620     | -    |
| México              | 76                       | 14      | -     | -       | -    |
| Michoacán           | 4,398                    | 3,718   | 164   | 2,608   | -    |
| Morelos             | 510                      | -       | -     | 13      | -    |
| Nayarit             | 3,274                    | -       | 602   | 30,581  | -    |
| Nuevo León          | -                        | 13,170  | -     | -       | -    |
| Oaxaca              | 58,148                   | 276     | -     | 3,302   | -    |
| Puebla              | -                        | 4       | -     | -       | -    |
| Querétaro           | -                        | 269     | -     | -       | -    |
| Quintana Roo        | 535                      | -       | -     | 560     | -    |
| San Luis Potosí     | 10,641                   | -       | -     | 28,708  | -    |
| Sinaloa             | 310,807                  | 18,274  | -     | 6,456   | -    |
| Sonora              | -                        | 157,630 | -     | -       | -    |
| Tabasco             | 10,594                   | -       | -     | 680     | -    |
| Tamaulipas          | 12,448                   | 2,525   | -     | 46,168  | -    |
| Veracruz            | 134,250                  | 37      | -     | 6,719   | -    |
| Yucatán             | 206                      | -       | -     | -       | -    |
| Total               | 708,708                  | 231,867 | 4,505 | 147,426 | 122  |

## CAPÍTULO 2

### PROCESO DE EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso que combina diferentes operaciones unitarias como el mezclado, la cocción, el amasado y el moldeo; el material que pasa por el proceso de extrusión se transforma y se presentan cambios fisicoquímicos por la tensión mecánica de los tornillos y la temperatura del barril (Emin *et al.*, 2016).

Durante el proceso, la materia prima acondicionada a una humedad de entre el 11 y 38% se alimenta hacia el extrusor, pasa a través del tornillo o tornillos en el interior del cilindro y el material se comprime, hasta obtener una masa plástica semisólida que dependerá de la geometría del tornillo, rotaciones y esfuerzo de cizallamiento, dicha masa pasa a través del orificio que forma parte final del cilindro (boquilla) generando una presión, al salir, la masa se descomprime, se evapora el agua contenida, se expande y se enfría obteniendo un producto extrudido (Suarez *et al.*, 2016).

Los extrusores se clasifican de acuerdo a su operación: en frío y por cocción; así como por la configuración de los tornillos: simple y doble. La extrusión en caliente se lleva a cabo a temperaturas por arriba de 100°C, reduce la contaminación microbiana e inactiva las enzimas. La extrusión en frío se utiliza para mezclar y dar forma, se presenta baja presión, genera una temperatura menor a 100°C en el interior del cilindro al pasar la masa debido a la fricción del tornillo. En ambos casos, se pueden procesar una gran variedad de productos como son los cereales para desayuno, botanas, productos para confitería, pastas, texturizados, derivados de la carne, entre otros. Una de las ventajas de utilizar la operación de extrusión es la versatilidad para obtener diversos productos mediante modificaciones en los ingredientes, condiciones de proceso y control de parámetros, entre ellas las formas de boquillas. Así mismo, se mejora la productividad y la calidad del producto siendo fácil de manipular (Fellows, 2017).

## **2.1. EXTRUSIÓN EN ALIMENTOS**

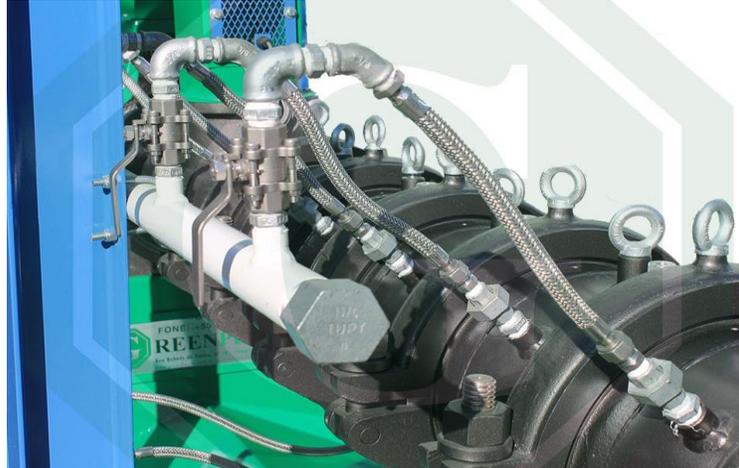
En los últimos 20 años, la extrusión se ha convertido en una importante herramienta para procesar alimentos y se abren nuevas posibilidades para el desarrollo de los mismos en el futuro. Es una de las tecnologías para modificar las materias primas de los productos existentes y generar alimentos funcionales. Así, el principal objetivo de la extrusión es extender la variedad que hay de los alimentos que componen la dieta a partir de ingredientes básicos y de su mezcla, diversas formas y tamaños, texturas, colores y olores. La extrusión en alimentos promueve cambios en los principales componentes de las materias primas utilizadas: polimerización entre proteínas y almidones, la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas, que se llevan a cabo por la velocidad del tornillo, alta presión, temperatura, cizallamiento y fuerzas de corte (Ai *et al.*, 2016; Moretti *et al.*, 2016).

## **2.2. CLASIFICACIÓN DE EXTRUSORES (ENFRIAMIENTO Y TRATAMIENTO TÉRMICO)**

Los extrusores para alimentos se clasifican termodinámicamente, por la presión que generan o por distintos criterios como son las características de funcionalidad de las materias primas. De acuerdo con lo anterior, se cuenta con los siguientes tipos de extrusores: Isotérmico, autógeno y politrópico (Ojokoh *et al.*, 2015).

### **2.2.1. ISOTÉRMICO**

Mantienen la temperatura constante a lo largo del equipo, enfriando o restableciendo el calor en la chaqueta envolvente (figura 8). Los extrusores moldeadores son los que pertenecen a este tipo de equipo, por ejemplo, para la elaboración de cereal para desayuno, botanas etc. (Tovar, 2012).



**Figura 8.** Extrusor isotérmico (Greenpeças, 2016).

### 2.2.2. AUTÓGENO

El calor se genera por la conversión de la energía mecánica en el flujo del proceso (figura 9). No se aplica calor o enfriamiento a través del cilindro o chaquetas envolventes. Este tipo de extrusores son utilizados para la elaboración de sopas, productos expandidos, etc. (Llopart, 2011).



**Figura 9.** Extrusor autógeno (Engormix, 2017).

### 2.2.3. POLITRÓPICO

Los extrusores politrópicos trabajan entre las condiciones de los isotérmicos y autógenos, se clasifican de acuerdo a la presión que generan (figura 10). El calor generado proviene de la disipación de la energía mecánica y fuentes auxiliares. Por ejemplo, los que se utilizan para la producción de cereales para desayuno, ingredientes para productos de panificación, aperitivos, etc. (Ocaña, 2013).



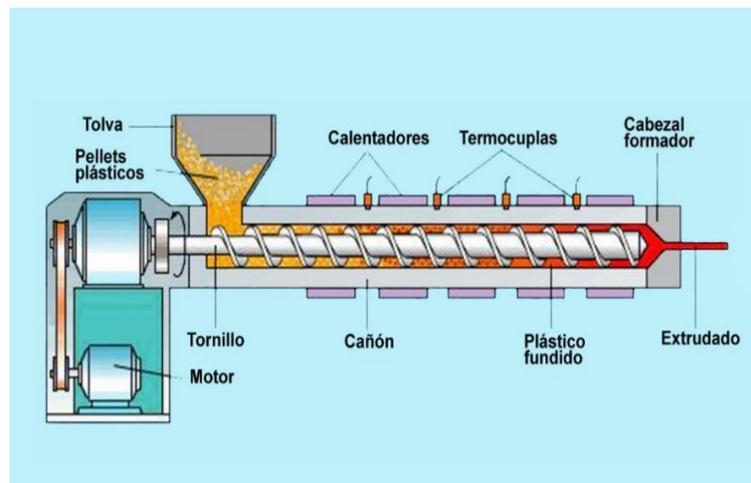
**Figura 10.** Extrusor con las condiciones isotérmicos y autógenos (Greenpeças, 2016).

### 2.3. CLASIFICACIÓN DE EXTRUSORES POR CONFIGURACIÓN DE TORNILLO

Los extrusores de alimentos también se pueden clasificar por su configuración del tornillo, extrusores de tornillo simple y doble (Kaur *et al.*, 2014).

### 2.3.1. EXTRUSORES DE UN SOLO TORNILLO

Los extrusores de un solo tornillo son los más utilizados en la industria de alimentos, producen más tonelaje de productos extrudidos que cualquier otro tipo de procesado por extrusión. Los distintos productos obtenidos por estos extrusores tienen densidad baja o alta, un ejemplo es la obtención de pasta parcialmente cocida y moldeada. El canal del tornillo en estos extrusores no está dividido, el tornillo es continuo a lo largo del cilindro y en lugar de ser empujado por las aletas del tornillo, el producto es arrastrado por el canal del tornillo tal como se muestra en la figura 11; debido al movimiento relativo del mismo y la superficie del barril (Barallat, 2017).



**Figura 11.** Extrusor de tornillo sencillo con componentes de flujo de arrastre (TP, 2011).

Existen varios ejemplos de extrusores de tornillo sencillo en la industria de alimentos, como los extrusores para la elaboración de pastas, que tienen instalado un cilindro con una pared lisa y la geometría del tornillo es constante. En otro caso, el extrusor formador de alta presión se utiliza para comprimir y dar forma a una masa pregelatinizada, tiene un cilindro con ranuras en el cual se presenta una fricción a través del tornillo. El extrusor cocedor de baja fricción es utilizado con masas de alto

contenido de humedad, si es necesario se aplica la operación de secado. Mientras que en el extrusor collet, se puede aplicar temperatura, logra expandir la materia prima y la transforma en material granular seco, como la harina de maíz para obtener productos expandidos como las botanas, es un extrusor de alta fricción y corto tiempo de residencia, presenta canales del barril o cilindros profundos. Finalmente, el extrusor cocedor de alta fricción parecido al extrusor collet en su operación, requiere mayor tiempo de residencia y enfriamiento externo, puede producir botanas, cereales expandidos, comida para mascotas etc. (Roos *et al.*, 2017).

### **2.3.2. EXTRUSORES DE DOBLE TORNILLO**

Los extrusores de doble tornillo se pueden clasificar sobre la base de la dirección de rotación del tornillo (Geetha *et al.*, 2014):

#### **a) Extrusores de doble tornillo en contra-rotación**

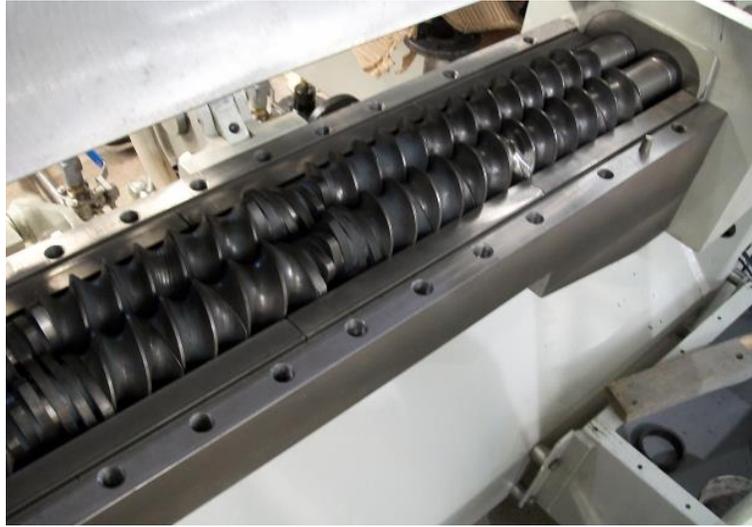
Estos extrusores tienen dos tornillos que se unen fuertemente como engranajes y rotan uno contra el otro (figura 12). Cada tornillo está dividido en una serie de cámaras separadas, las cuales se mueven hacia el dado mientras que el tornillo rota llevando el producto en ellas. Son buenos transportadores de la materia prima; sin embargo, son utilizados para transportar material viscoso y requieren de temperaturas bajas. El flujo viscoso somete la materia prima a un proceso de mayor fricción. Estos equipos tienen aplicación en la industria de dulces y confitería (Martín, 2016).



**Figura 12.** Doble tornillo de equipo extrusor (CLEXTRAL, 2019).

#### **b) Extrusores de doble tornillo en co-rotación**

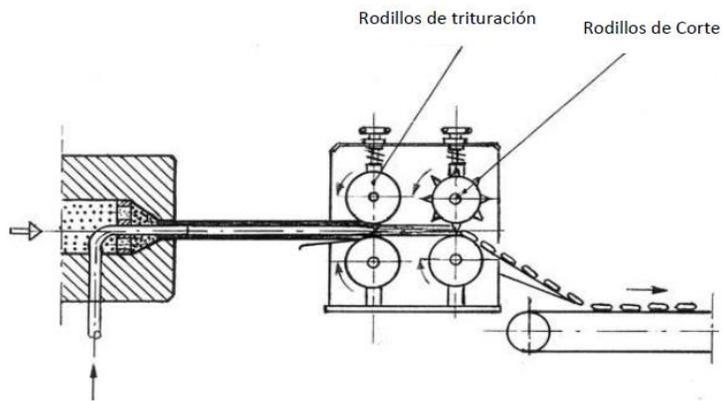
Estos extrusores tienen características tanto del extrusor de tornillo simple, como de doble tornillo en contra-rotación y opera de manera intermedia entre ambos, los tornillos se entrelazan y no pueden crear cámaras separadas a lo largo del cilindro (figura 13). Este tipo de extrusores tiene una eficiencia de bombeo, un buen control de tiempos de residencia y uniformidad en el proceso. Las aletas se entrelazan o traslapan, se encuentran en ángulos opuestos por lo que requieren un espacio adicional. En el punto de traslape el producto es raspado de la superficie de cada canal por la intersección de las aletas, con lo cual el producto se distribuye (Bouvier y Campanella, 2014).



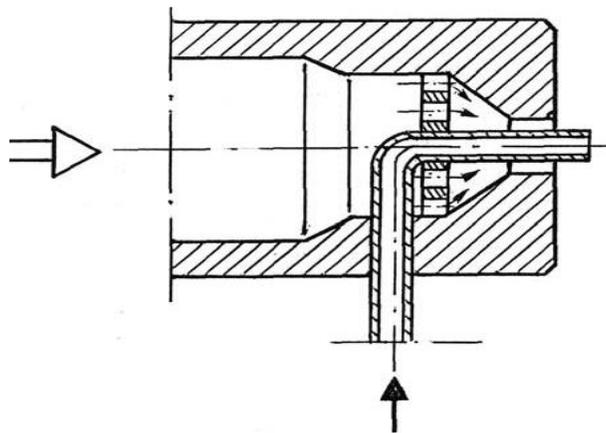
**Figura 13.** Extrusor de doble tornillo co-rotación (IBH, 2019).

### **2.3.3 CO EXTRUSIÓN**

La tecnología de Co extrusión es un proceso de extrusión, utilizado para obtener un producto que combina dos texturas de dos materiales diferentes para formar uno solo. Se utiliza para rellenar producto extrudido durante el mismo proceso, se configuran dos extrusores de la misma configuración de tornillo (doble tornillo), uno de ellos transporta la materia prima en un fluido fundido para rellenar el extrudido, al final del proceso de extrusión se conectan en una misma geometría del cabezal y troquel, que permiten que el producto extrudido se expanda y se rellene. Hay extrusores con un dado diseñado que sale del extrusor en forma de tubo, se llena simultáneamente con relleno y se aplana entre dos rodillos, se corta en pedazos, se sella y se termina (Figuras 14 y 15). La co extrusión por ejemplo se puede utilizar para crear malvaviscos multicolores, así como para rellenar este producto, galletas y almohadas rellenas (Hartel *et al.*, 2018).



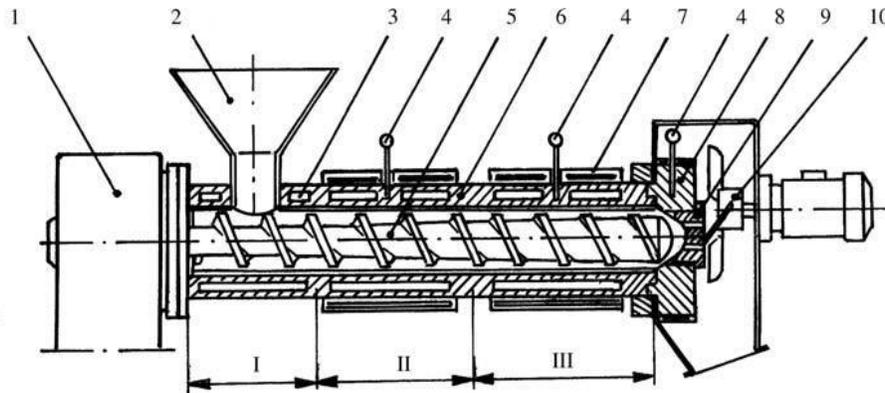
**Figura 14.** Cortador con un par de rodillos que prepara productos coextrudidos (Moscicki, 2011).



**Figura 15.** El llenado de coextrudidos (Moscicki, 2011).

## 2.4. ZONAS Y FUNCIONES OPERATIVAS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

El equipo de extrusión cuenta con diferentes zonas de proceso y a continuación se describen en la figura 16:



**Figura 16.** Equipo de extrusión: 1. Motor, 2. Alimentador, 3. Chaquetas de calentamiento, 4. Termopares, 5. Tornillo simple, 6. Barril, 7. Resistencias, 8. Cabezal, 9. Troquel formador, 10. Cortador, 10. Transportador. Zona I alimentación, zona II compresión, zona III fusión y plastificación (Adedeji, 2016).

#### **2.4.1. ZONA DE ALIMENTACIÓN**

En la cual se encuentra una tolva instalada con un cilindro para descargar los ingredientes o materiales hacia los alabes del tornillo. De velocidad variable y para transportar de manera uniforme. Algunas veces los equipos de extrusión tienen un preacondicionador, de tal modo que las partículas o materiales alcancen el equilibrio de acondicionamiento a cierta humedad y temperatura durante un tiempo determinado. Se requiere de una mezcla homogénea ya que beneficia la incorporación del agua y vapor inyectada hacia el cabezal, el cual ayudará a que fluya el material, el aire es atrapado y se transforma en una masa donde se comprime el aire el cual es expulsado y se eliminan los espacios vacíos dentro del cilindro o cámara (Gibson *et al*, 2015).

El flujo de alimentación afecta la transferencia de calor y el contenido de humedad del material. El índice de absorción de agua y la solubilidad de agua disminuyen cuando la alimentación aumenta. Se puede calentar el cilindro de entrada de alimentación con vapor o resistencias eléctricas; además tienen un sistema de enfriamiento en diferentes zonas a lo largo del cilindro y en la parte final del dado o troquel para dar la forma del producto extrudido, también tienen instalada una cuchilla (Gómez, 2013).

#### **2.4.2. ZONA DE COMPRESIÓN**

La compresión se ejerce en los canales de flujo del extrusor, el llenado de material dependerá del grado de inclinación del tornillo, aumenta la relación de esfuerzo cortante (cizalla) y la energía mecánica suministrada a la masa aumenta la temperatura, a medida que la masa o mezcla de ingredientes fluye a través del tornillo este es mezclado (amasado) en forma homogénea alcanzando una compactación (Ocaña, 2013).

### **2.4.3. ZONA DE FUSIÓN Y PLASTIFICACIÓN**

Se presenta una fusión en la masa o mezcla de ingredientes, se plastifica aumentando la temperatura y presión rápidamente, la velocidad de formación aumenta con la configuración del tornillo del equipo extrusor, la temperatura y la viscosidad son resultado del fluido de tal manera que el extrudido es expulsado a partir de un troquel formador y se obtendrá una textura, densidad, color y características deseadas del producto final. Esta zona es importante ya que fluye el material, se comprime, se homogeniza, pasa a través de la boquilla a presión constante para obtener el producto extrudido (Keawpeng *et al.*, 2014).

### **2.4.4. VELOCIDAD DEL TORNILLO**

El flujo durante el proceso de extrusión va en relación con la velocidad del tornillo (Sarguini *et al.*, 2016). La velocidad del tornillo varía en algunos extrusores entre 10 y 400 rpm (Cheng *et al.*, 2016) dependiendo la configuración del extrusor. Hay tornillos cuyas medidas internas van disminuyendo respecto a la longitud, al inicio del cabezal del equipo extrusor con 43 mm, reduciéndose al final del mismo hasta 28 mm (Gulati *et al.*, 2016). Cuando hay baja velocidad del tornillo no hay fuerza de cizallamiento (Cheng *et al.*, 2016). Un ejemplo es en la harina de maíz y arroz con una velocidad del tornillo de 75 rpm, humedad de 25%, temperaturas entre 80 y 140°C con un dado de troquel de 1.88 mm. Los resultados mostraron que al aumentar la temperatura del extrusor con las condiciones antes mencionadas disminuyó el tiempo de residencia a través del tornillo en el interior del cilindro (Shan *et al.*, 2015).

#### **2.4.5. TERMOPARES**

Los termopares están conectados al barril, cilindro o chaquetas del equipo extrusor para controlar la temperatura interna del material que pasa por el proceso, tienen un tiempo de respuesta lento, varía entre 1 o varios segundos, permiten solo la medición. Como alternativa, se han utilizado instrumentos de medición infrarrojos (Emin *et al.*, 2016).

#### **2.4.6. TEMPERATURA DE LAS CHAQUETAS DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN**

La temperatura de extrusión es un parámetro importante que puede variar entre 40 y 190°C y otras temperaturas más altas. La temperatura del barril promueve la gelatinización del almidón, aumenta la dextrinización, funde y encapsula el material, aumenta la presión interna del extrusor, disminuye la viscosidad, plastificando o expandiendo por alineamiento de moléculas (Ai *et al.*, 2016).

#### **2.4.7. TIEMPO DE RESIDENCIA O DE RETENCIÓN**

El tiempo de retención en el barril o cilindro del equipo extrusor puede variar desde 5 segundos hasta 2 minutos y depende de la configuración del tornillo y del equipo de extrusión (Shan *et al.*, 2015).

#### **2.4.8. PRESIÓN**

La presión y flujo se generan por el material que se transporta por los tornillos. La presión en el barril o cilindro puede controlarse modificando el flujo hacia adelante o hacia atrás, un ejemplo es la rápida liberación de presión que se produce a la salida de la boquilla evaporando el contenido de agua; para productos expandidos se emplean presiones elevadas y orificios pequeños instalados en los dados de la parte final del equipo de extrusión (Ojokoh *et al.*, 2015).

#### **2.4.9. CORTE Y MEZCLA**

El corte o cizallamiento es la fuerza por unidad de área necesaria para alcanzar una deformación, en la cual se genera una velocidad que se denomina velocidad de deformación (cambios que se generan entre dos puntos) y con el mezclado se logra la distribución de los componentes o materias primas, en un volumen que deberá tener la misma composición en cualquier punto (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2014).

El material o mezcla de materia prima contenido en el tornillo del equipo extrusor, es cortado y se adhiere a dos superficies: tornillo y barril (cilindro) en el cual se genera una velocidad tal que provoca el deslizamiento del material capa sobre otra capa y a esto se le llama corte, que es directamente proporcional a la velocidad y diámetro del tornillo e inversamente proporcional a la profundidad del canal. El corte hace que la mezcla se estire y al aplicar temperatura se gelatinicen los almidones y se generen otras reacciones en el proceso de extrusión (Bouvier y Campanella, 2014).

#### **2.4.10. FORMA Y TAMAÑO DE DADOS**

El dado o boquilla esta ensamblado en el troquel formador, en varios casos introducen partes que se pueden reemplazar para instalar diferentes tamaños y formas de orificios en los dados. El dado tiene influencia en el flujo del material en el tornillo de extrusión y contribuye directamente a la texturización del producto por el corte desarrollado (Emin y Schuchmann, 2016).

#### **2.4.11. CORTADOR**

El producto se corta en pedazos, pasa por las cuchillas que están sostenidas cerca de los dados, el tamaño del producto final dependerá de la velocidad del cortador medida en rpm y de la composición del producto final (Riaz y Rokey, 2012).

#### **2.4.12. SECADO**

El secado es un proceso de conservación que elimina el agua en un alimento, impide la actividad microbiana y reduce la actividad enzimática. Los métodos de secado se han desarrollado de acuerdo a los requerimientos específicos de cada producto y se utilizan diferentes clases de equipos, hay secadores con charolas de circulación de aire, secador de túnel, rotatorios, tambores, por aspersión, etc. En el alimento a secar se pone en contacto con frecuencia con el aire para eliminar la humedad mediante la evaporación o la vaporización, el objetivo es llegar a una humedad deseada del material, un ejemplo es la evaporación que consiste en colocar el alimento en charolas perforadas, en cámaras de circulación de aire caliente que proviene de un calentador o ventilador (Singh *et al.*, 2009).

El secado involucra el desarrollo de textura del producto final. El producto extrudido generalmente se somete a un secado a una temperatura entre 100 y 110°C durante 10 y 15 min, para alcanzar una humedad final en general entre 7 y 14% y se debe evitar que se troce el producto; con estas condiciones se disminuye el crecimiento de microorganismos y se alarga la vida de anaquel del producto (Ai *et al.*, 2016).

## CAPÍTULO 3

### EFEECTO Y PROPIEDADES DE LAS MATERIAS PRIMAS EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Las propiedades del material que se alimenta en el extrusor tienen una influencia importante en la textura y color del producto final. A considerar: tamaño de partícula, contenido de agua, composición química, particularmente la cantidad de almidón, proteína, grasa, y carbohidratos, así como el pH del material (Thomas *et al.*, 2013).

#### 3.1. POLÍMEROS EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Un gran número de polímeros se pueden utilizar a partir de fuentes de origen animal y plantas, particularmente en los cereales que se utilizan con frecuencia en la extrusión de alimentos, son de importancia la proteína y el almidón. Los polisacáridos son polímeros que se clasifican según su estructura, hay tres tipos principales, por ejemplo, polisacáridos de almacenamiento como almidón, glucógeno y polisacáridos estructurales como celulosa y quitina (proviene de los crustáceos y la celulosa de las plantas), en la Tabla 3 se mencionan algunos de ellos (Nielsen, 2017).

**Tabla 3. Polisacáridos y su fuente de origen (Nielsen, 2017).**

| Fuente                      | Polímero                         |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Células de plantas          | Pectina                          |
| Semillas                    | Almidón                          |
| Algas marinas               | Carragenina                      |
| Madera                      | Celulosa, hemicelulosa y lignina |
| Pieles y huesos de animales | Gelatina, xantana                |

### **3.1.1. TIPOS DE ALMIDÓN**

El almidón es un carbohidrato fundamental en la dieta del hombre, que se le ha dado un uso industrial. Se encuentra en los cereales, tubérculos y frutas, como polisacáridos de reserva energética. Los cereales que contienen almidón de forma natural presentan mayor contenido de amilosa, lo que confiere mayor elasticidad en el caso del proceso de extrusión. Para obtener un producto extrudido de textura y dureza adecuadas, el cereal utilizado debe contener del 5 al 20% de amilopectina (Badui, 2012).

#### **3.1.1.1. ALMIDÓN Y ALMIDÓN MODIFICADO**

El polímero de almidón es un carbohidrato que contiene cadenas lineales (amilosa alfa 1,4) y ramificadas (amilopectina alfa 1,6) es insoluble en agua y alcohol, al aplicar calor se puede disolver en el agua por el proceso de gelatinización. El almidón contiene entre 20 -25% de amilosa y entre 75-80% de amilopectina. La amilopectina tiene un peso molecular más grande que la amilosa (Olatunji, 2016).

El almidón se utiliza en una variedad de aplicaciones industriales principalmente adhesivos, papel y ropa; así como cremas, cosméticos, como espesante de alimentos y en la producción de papel. Para el procesamiento del almidón se han utilizado varias tecnologías como: fusión, extrusión, inyección, moldeo y compresión.

El almidón nativo no es adecuado para su aplicación directa, debido a su alta viscosidad y es inestable por que presenta una retrogradación después de la gelatinización. Los factores que determinan los cambios en la composición del almidón durante la cocción del proceso de extrusión son la presión, fuerzas de cizallamiento, tipo de tornillos, velocidad de los tornillos, compresión y tamaño del dado (Nakamura, 2015).

En el proceso de extrusión a temperaturas arriba de 100°C, los gránulos de almidón pierden características relacionadas directamente con la gelatinización del almidón,

se hinchan por el calor, absorben agua, pierden cristalinidad, tienen mayor solubilidad en agua y aumenta la viscosidad de la masa. Además, las regiones cristalinas se fusionan (Moretti *et al.*, 2016) y se producen burbujas en el extrudido debido al bajo contenido de humedad produciendo la expansión del extrudido (Kristiawan *et al.*, 2016).

Se obtiene una textura deseable dependiendo del porcentaje de humedad, contenido de lípidos y la velocidad del tornillo a través del equipo de extrusión, si la humedad de la materia prima se encuentra entre 25-30% aumenta la plasticidad. Si el contenido de humedad baja, se reduce la plasticidad y aumenta la textura porosa del producto extrudido sobre los gránulos del almidón (Gulati *et al.*, 2016).

En el caso del almidón modificado, las propiedades funcionales del almidón varían por la cantidad y conformación de amilosa y amilopectina, estructura granular y otros componentes. El almidón es químicamente y físicamente modificado para lograr su funcionalidad. Las modificaciones del almidón reducen la viscosidad y la fusión al aplicar temperaturas, lo que los hace más adecuados para el proceso de extrusión (Nakamura, 2015).

La utilización de almidón alto en amilosa proporciona mejores propiedades mecánicas debido a que la amilosa proporciona una red tridimensional y forma una película. La hidrólisis ácida de almidones también mejora la claridad en los recubrimientos (Villarreal *et al.*, 2018).

### **3.1.2 PROTEÍNA**

El contenido de proteína de los cereales se encuentra entre 8 y 17%, predominan la prolamina y la glutenina. Las proteínas contenidas en dichos cereales se desnaturalizan por el tratamiento térmico arriba de 60°C, llevando a cabo reacciones de Maillard, formación de textura viscosa y elástica de la mezcla en la zona de cizallamiento. Un alto contenido de proteína en el proceso facilita la flexibilidad y aireación de la masa. La extrusión puede mejorar la digestibilidad de las proteínas

por medio de la temperatura aplicada durante el proceso en las diferentes zonas del equipo, velocidad del tornillo y contenido de humedad (Jovanka *et al.*, 2010).

Temperaturas mayores a 110°C en el proceso de extrusión, tiempo corto, no destruye los enlaces peptídicos, se desnaturaliza la proteína (ruptura de la estructura secundaria y terciaria). El grado de desnaturalización de la proteína se mide con el cambio de contenido de nitrógeno después de la extrusión. El agua que se adiciona a la materia prima para su acondicionamiento varía entre 12 y 38%, ayuda a transportar el material durante la operación de extrusión, es uno de los factores principales para controlar la temperatura y la velocidad de la extrusión de la materia prima, así como las características del producto final extrudido. El contenido de humedad afectará la densidad del producto, el grado de expansión, la rehidratación, la gelatinización del almidón, el índice de absorción de agua, índice de insolubilidad, la solubilidad de la proteína, el color, la viscosidad y el cizallamiento. A mayor contenido de humedad, mayor plasticidad sobre los gránulos del almidón de los cereales, impidiendo la degradación de cizallamiento en el extrudido obtenido, a mayor humedad el producto extrudido será menos expandido (Gulati *et al.*, 2016).

Menor contenido de humedad generará menor dureza del producto extrudido. Maíz y trigo con una humedad de 17% provocarán una densidad alta del producto extrudido y con una humedad de 25% una densidad baja. El equipo extrusor atascará y no fluirá el material en el caso de un contenido bajo de humedad, alta viscosidad de la materia prima y temperaturas de fusión (Ai *et al.*, 2016).

### **3.1.3. CELULOSA**

La celulosa es un componente estructural de la pared celular de las plantas verdes. Alrededor del 33% de toda la materia vegetal es celulosa. La celulosa es insoluble en agua y disolventes orgánicos, es biodegradable. Polímero de cadena lineal no se enrolla, ni se ramifica y puede adoptar una rigidez, es más cristalina que el almidón cuando se aplican temperaturas en agua entre 60 y 70°C. La mayoría de la celulosa se utiliza para la industria de papel y productos de cartón. Se producen fibras de celulosa por medio de extrusión para producir pulpas que se aplican en moldeadores, obtención de cartón y embalaje (Nielsen, 2017).

## **3.2. CAMBIOS FÍSICOS EN LAS MATERIAS PRIMAS**

Durante el proceso de extrusión las materias primas sufren cambios físicos que permiten que el producto final presente características reológicas y sensoriales deseadas (Cui, 2005).

### **3.2.1. TAMAÑO DE PARTÍCULA**

El tamaño de partícula en los alimentos depende de la estructura celular y las condiciones de proceso, tipo de equipo y producto que se quiere obtener. Las características físicas, químicas y el tipo de molienda son un factor importante para la distribución del tamaño de partícula, la cual mejora la expansión y textura en un producto extrudido. Las propiedades de partículas son determinadas con un reómetro para medir el flujo de las partículas, compresión, cohesión, indicadores para la fluidez en el equipo de extrusión (Merkus y Meesters, 2016).

El diseño y configuración del tornillo en los equipos de extrusión también influyen en el flujo de partículas. Por ejemplo, para obtener partículas grandes en el equipo de extrusión se requieren condiciones de temperaturas altas, tiempo prolongado durante el proceso y retardar la gelatinización, mientras que para obtener partículas finas se requiere tiempos cortos, bajas temperaturas en el proceso, obtener una

baja viscosidad del fluido y mejores resultados de absorción de agua. El tamaño de partícula utilizado para el proceso de extrusión es  $<700 \mu\text{m}$  (Moretti *et al.*, 2016).

### **3.2.2. DENSIDAD DEL PRODUCTO EXTRUDIDO**

La densidad del producto extrudido puede cambiar debido a la evaporación del agua en la materia prima al aplicar calor durante el proceso de extrusión, en la expansión del almidón, tamaño de la burbuja interna formada en el interior del extrudido y a la porosidad. Un ejemplo para el maíz y trigo con una humedad del 17% se obtiene una densidad alta del producto extrudido y con una humedad de 25% se obtiene una densidad baja. Una humedad mayor al 25% para mezclas acondicionadas con harina de trigo, aumentará la densidad del producto extrudido (Cheng *et al.*, 2016).

### **3.2.3. VISCOSIDAD**

La viscosidad de una mezcla sólido – líquido depende de la fracción de volumen del sólido, contenido de agua y de la temperatura por el cual pasa la mezcla a través del barril o cilindro del equipo extrusor, por ejemplo, después de la extrusión a temperaturas arriba de  $100^{\circ}\text{C}$ , la humedad alta disminuye la viscosidad, debido a que se presenta mayor gelatinización en el caso del almidón. Con una viscosidad alta, la expansión en el extrudido se detiene (Kristiawan *et al.*, 2016).

Un ejemplo es el caso de la harina de arroz acondicionada a una humedad elevada, durante el proceso de extrusión disminuye la viscosidad a temperaturas arriba de  $100^{\circ}\text{C}$ , en general, la expansión alta de los gránulos del almidón reduce la viscosidad de una mezcla fundida (Zhuang *et al.*, 2010).

### **3.2.4. EXPANSIÓN**

En el equipo de extrusión se requiere que se genere una presión para lograr productos expandidos de baja densidad. Con estructuras altamente expandidas de 0.1 g/ml se obtienen texturas crujientes. La dureza aumenta a medida que aumenta la densidad aparente. La expansión también va relacionada con el diseño: configuración de los tornillos, medidas del barril y del dado, así como del diseño de la parte final del equipo de extrusión. Si las condiciones de cizallamiento son bajas la expansión es limitada. Por otro lado, con un contenido de humedad superior a 30% disminuye la expansión en los productos extrudidos. En general los cereales requieren condiciones altas de temperatura y humedad para su expansión, los componentes presentes intervienen en la expansión (Aguilera y Lillford, 2008).

### **3.3. MATERIAS PRIMAS**

#### **3.3.1. ARROZ**

La harina de arroz se acondiciona a un porcentaje de humedad entre 10-15. En general, se aplican temperaturas entre 150-175°C en las diferentes zonas de calentamiento de las chaquetas o del cilindro. La masa pasa a través de un tornillo, esta se expande de 60-75% con una presión de 5-10 Mpa, en la parte final del troquel se obtiene una mezcla elástica con características expandibles y un contenido de humedad final del extrudido entre 3-4% (Moscicki, 2011).

Un ejemplo es en la harina de arroz y maíz con una velocidad del tornillo de 75rpm, humedad de 25%, temperaturas entre 80 y 140°C con un dado de troquel de 1.88 mm. Los resultados mostraron que al aumentar la temperatura del extrusor con las condiciones antes mencionadas disminuyó el tiempo de residencia a través del tornillo en el interior del cilindro (Shan *et al.*, 2015).

### **3.3.2. MAÍZ**

En el proceso de extrusión, al aplicar altas temperaturas arriba de 135°C en el almidón de maíz, aumenta la dureza, se presenta menor expansión del extrudido debido a la disminución de aglomeración de las proteínas y el producto final es más digerible. La temperatura de gelatinización de maíz es de 62°- 80°C y el almidón de maíz entre 50-65°C, no tiene cambios físicos y químicos significativos. Arriba de 200°C hay deformación parcial o total del almidón durante la extrusión. La adición de leguminosas al maíz disminuye la expansión, la interacción del almidón y la fibra de las leguminosas rompen las paredes celulares y evita que se formen las burbujas de aire para que se logre la expansión. El almidón de maíz ceroso libre de amilosa a temperaturas arriba de 70°C durante el proceso de extrusión destruye el gránulo de almidón. La harina de maíz de tamaño de partícula más grande fluye por el extrusor más rápido, ya que se compacta mejor durante el proceso de extrusión que la harina de maíz fina (Jozinovic *et al.*, 2016).

### **3.3.3. TRIGO**

La temperatura de gelatinización del almidón en el trigo es de 52-65°C (Borah *et al.*, Kristiawan *et al.*, 2016). El trigo contiene gliadina, que tiene un papel lubricante por su forma globular, en la harina de trigo durante el proceso de extrusión disminuye el contenido de albúmina, globulina, prolamina y gluten (Sarguini *et al.*, 2016).

El salvado de trigo contiene fibras y acondicionado al 20% de humedad y aplicando temperaturas de 140°C en el barril del equipo extrusor, reduce el contenido de polifenoles, inhibición de tripsina y la expansión, aumentando la densidad aparente en el producto extrudido (Kaur *et al.*, 2015).

### **3.3.4. LEGUMINOSAS**

La gelatinización que se produce en las leguminosas durante el proceso de extrusión provoca un aumento de la absorción de agua, hay ruptura de los gránulos de almidón y aumenta la viscosidad de la masa. El enfriamiento rápido causa endurecimiento de la mezcla que contiene leguminosas, los hidratos de carbono incorporados en la proteína fundida forman una estructura en forma de panal, formado por fibra y proteína resultado de la combinación de alta temperatura y presión. Se recomienda una proporción de 30:70 de leguminosas y cereales para incorporarlos al proceso de extrusión (Villarroel *et al.*, 2018).

El residuo de soya subproducto de leche de soya y tofu, representa una fuente de fibra dietética, la fibra total en residuos de soya es de alrededor del 60% y fibra dietética soluble esta entre 2 y 3%, el residuo de soya se acondiciona al 31% de humedad y temperatura del barril o chaquetas de calentamiento a una temperatura de 115°C, durante el proceso de extrusión. El efecto de extrusión en el frijol variedad *Phaseolus vulgaris*, representa un 14% de aumento en la cantidad de compuestos fenólicos en comparación con los frijoles crudos, las harinas de frijol acondicionadas al 22% de humedad y aplicando temperaturas en el barril o chaquetas de calentamiento del equipo extrusor, reduce el contenido de polifenoles totales (Obradović *et al.*, 2014).

## **3.4. ADITIVOS**

### **3.4.1. COLOR**

El color cambia por la composición de las materias primas, como es el contenido de carbohidratos, agua, pH y la aplicación de temperatura, ya que se forman reacciones de Maillard durante el proceso de extrusión (Kaur *et al.*, 2014).

### 3.4.2 SABORES

Los sabores que se generan durante la cocción del proceso de extrusión, provocan una reacción de Maillard a partir de los aminoácidos y azúcares reductores, y reacciones sobre las proteínas contenidas en los ingredientes. Generalmente, los sabores se añaden debido a que los productos obtenidos por extrusión no contienen un sabor fuerte por el corto tiempo de residencia en el equipo y las temperaturas altas. Los sabores también pueden ser agregados en la parte externa del producto como recubierta después del proceso de extrusión. Aplicar una capa de aceite y sabor después del proceso de extrusión tiene como desventaja la oxidación del sabor, debido a la exposición directa del medio ambiente, además de incrementar el contenido calórico del extrudido, debido a la adición de la capa de aceite como material adherente del sabor. Aplicar el sabor antes de la extrusión en la materia prima brinda una distribución homogénea o uniforme del sabor en el extrudido, mejora la estabilidad y disminuye la oxidación, debido a la exposición directa del sabor en la superficie. El proceso de extrusión se utiliza también para encapsular sabores, la mezcla o masa acondicionada pasa a través del barril o cilindro a presiones inferiores 700 Kpa y temperaturas inferiores de 115°C para evitar la pérdida del sabor. Los saborizantes no están estrictamente encapsulados en una matriz, consiste en dispersar el sabor en la masa o mezcla de materias primas acondicionadas con un contenido de agua, los carbohidratos se funden al aplicar temperatura y pasar a través del barril, se forma la matriz encapsulada y se endurece el extrudido disminuyendo el contenido de humedad (Castro, 2014).

Los almidones modificados con propiedades de emulsificación pueden reemplazar a la sacarosa produciendo un producto sin azúcar, agregar un contenido de azúcares en el material para extrudir aumenta las reacciones de Maillard, caramelización, reacciones sobre la proteína, aumenta la temperatura de la mezcla que pasa a través de las diferentes zonas de calentamiento y disminuye el grado de expansión en el proceso. La principal ventaja en el proceso de extrusión es la protección de los sabores para evitar la oxidación. Un ejemplo es el aceite de

cáscara de naranja extrudido, el cual mostró una vida útil de más de 4 años, superior a cualquier otro método de encapsulación. Los antioxidantes a menudo se agregan a los aceites aromatizantes en un 10% para proporcionar sabor. Los sabores extrudidos son solubles en agua caliente lo que hace adecuado para aplicar en una gran variedad de mezclas secas. Para mezclas que van a pasar por el proceso de extrusión, se utilizan algunos ingredientes como sabores y sal entre 1- 1.5% (Barbosa *et al.*, 2005).

## CAPÍTULO 4

### PRODUCTOS EXTRUDIDOS EN ALIMENTOS

#### 4.1. VALOR NUTRIMENTAL EN LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS ALIMENTICIOS

Las vitaminas pueden destruirse por la aplicación de altas temperaturas y la oxidación. En el proceso de extrusión se aplican en general temperaturas superiores a los 100°C, por lo que se espera una pérdida de vitaminas hidrosolubles sensibles a la temperatura como la vitamina C (Haroon *et al.*, 2013).

En los cereales extrudidos hay cambios en las vitaminas del grupo B, en particular la vitamina B1 tiamina, riboflavina B2 y niacina. La tiamina es la más sensible a las altas temperaturas. Por el contrario, la riboflavina y la niacina mostraron alta resistencia en el proceso de extrusión, la pérdida de riboflavina es menor, se puede retener en un 92%. La tiamina disminuye con un contenido de humedad de 30% en el material a extrudir. Al ajustar adecuadamente las condiciones de tratamiento térmico, temperaturas entre 30, 49, y 50 °C en el equipo extrusor, se puede reducir la vitamina C, solo entre un 50 y 60%. Añadir vitamina A en el material extrudido aumenta la estabilidad en los productos obtenidos, siendo mayor que en las materias primas. La vitamina E casi no se destruye en el proceso de extrusión (Mine *et al.*, 2010).

Durante el proceso de extrusión se rompe la estructura de los aminoácidos que forman la proteína de los cereales, la pérdida más considerable es en el contenido de lisina, histidina, treonina y fenilalanina. El triptófano generalmente es deficiente en algunos cereales, como el maíz. Varios experimentos han demostrado que al aplicar temperaturas de 32, 37, 57, 59 y 60°C durante 10, 70 segundos y 30 minutos del proceso de extrusión hay una reducción de lisina en los productos extrudidos. Mientras que, al aplicar temperaturas en el equipo extrusor de 10 y 26°C no hay pérdida del contenido de lisina (Ai *et al.*, 2016).

## 4.2. PROCESOS PARA LA ELABORACIÓN DE PRODUCTOS EXTRUDIDOS

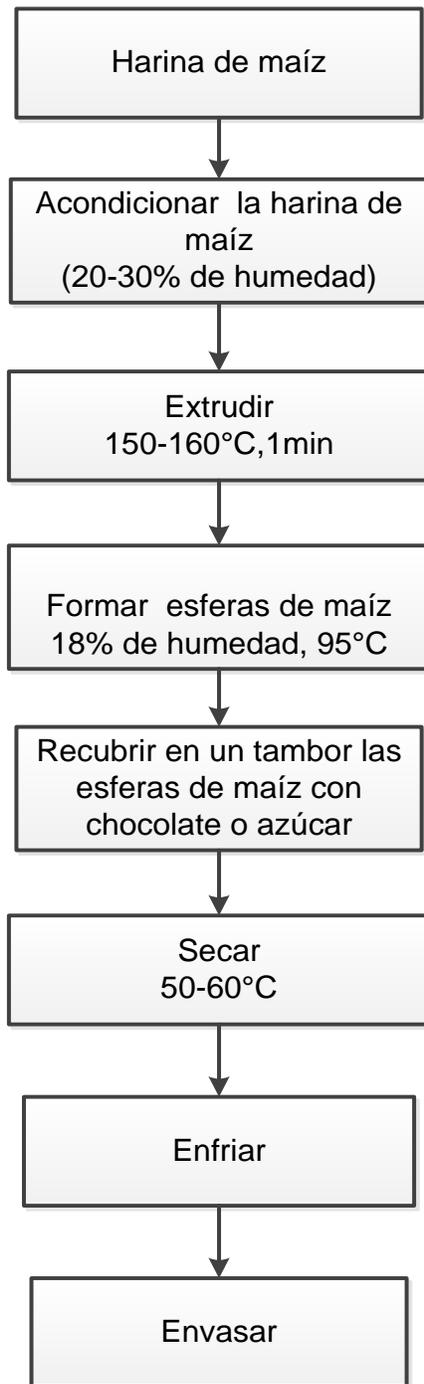
El éxito de la extrusión considera algunos aspectos tales como: el diseño de equipo, la configuración de los tornillos, la etapa de acondicionamiento, la presión que se ejerce en el interior del equipo, el cizallamiento, las temperaturas en las diferentes zonas de calentamiento y la zona de plastificación, factores que permitirán obtener la densidad, las propiedades químicas, sabor y forma del producto extrudido esperadas (Shinde *et al.*, 2016).

### 4.2.1. PROCESO DE ELABORACIÓN DE CEREAL EXPANDIDO DE MAÍZ PARA DESAYUNO EN FORMA DE ESFERA Y HOJUELA

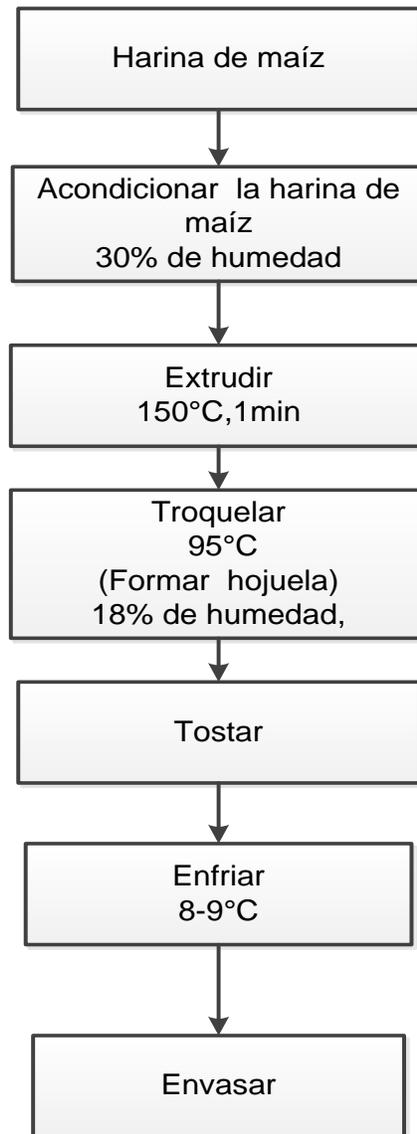
Las esferas y hojuelas de maíz se producen en todo el mundo, en Europa occidental se utilizaban tradicionalmente desde 1970 para los desayunos. A la fecha, las esferas (ver proceso en diagrama 1) y hojuelas de maíz (ver proceso en diagrama 2) se producen por extrusión, estos productos han ganado enorme popularidad en los países desarrollados debido a su sabor, características dietéticas, facilidades de uso y no requieren la cocción (figuras 17, 18 y 19) (Korkerd, 2016).



**Figura 17.** Diferentes muestras de cereales para desayuno recubiertos y expandidos (Porenta, 2019; Purnomo, 2019).



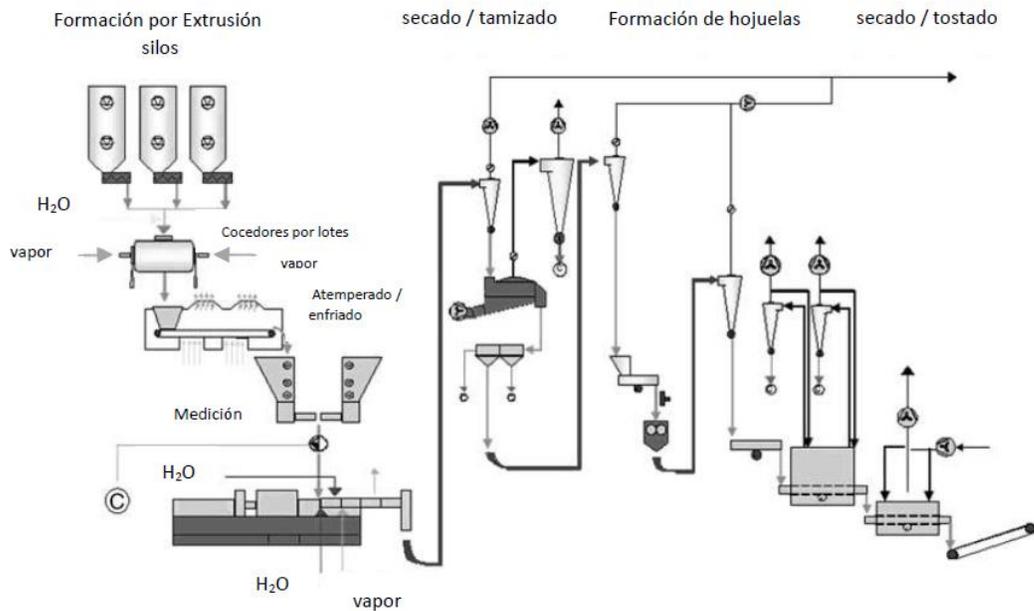
**Diagrama 1.** Proceso para la elaboración de esferas a base de cereal (Moscicki, 2011).



**Diagrama 2.** Proceso para la elaboración de hojuelas a base de cereal (Cueto, 2016).



**Figura 18.** Hojuelas de cereal (Siribout, 2019).



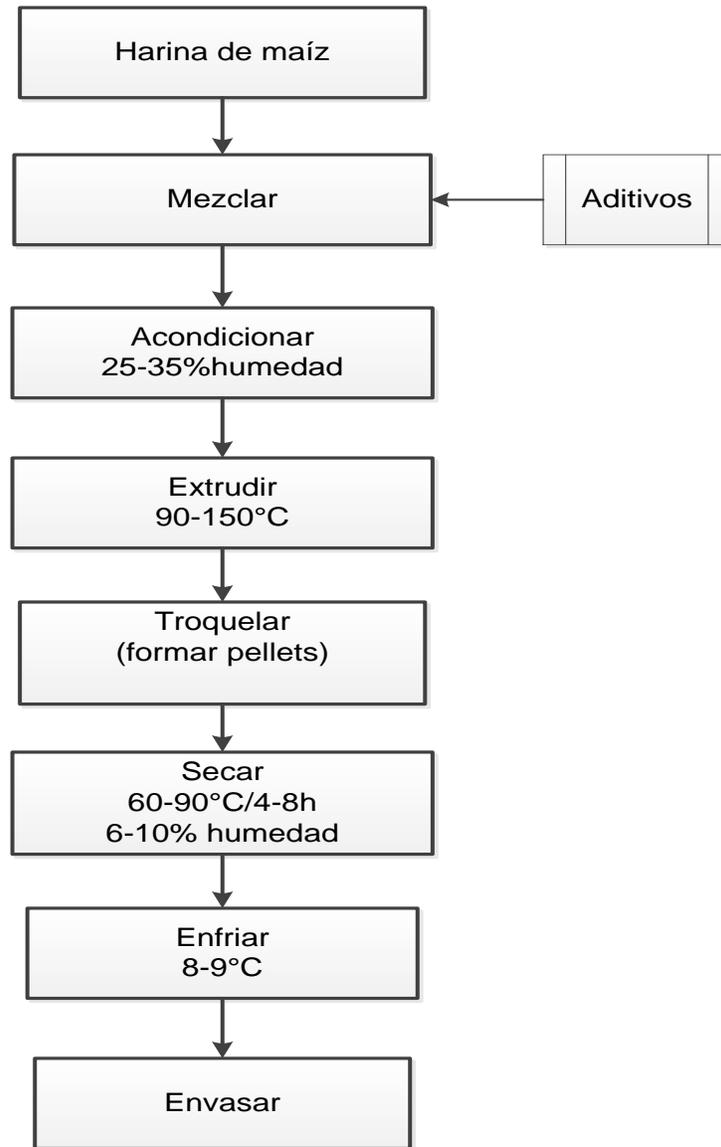
**Figura 19.** Línea de cereal de extrudido de maíz equipada con un extrusor de doble tornillo (Moscicki, 2011).

#### 4.2.2. SNACKS

En los últimos años además de las esferas de maíz y cereales para desayuno, los pellets son elaborados en una segunda etapa, son fabricados a partir de una variedad de mezclas de harinas con alto contenido de almidón y otros son freídos. Se elaboran principalmente de trigo, maíz y papa (figuras 20 y 21). La vida de anaquel podría llegar hasta doce meses. Su densidad aparente es de 0.3 y 0.4 g/cm<sup>3</sup>, la humedad no debe exceder de 8%, estos productos a veces se fríen en aceite. Se pueden elaborar pellets duros y frágiles, dependerá del porcentaje de la harina de cereal que se va adicionar en la formulación, su proceso se observa en el diagrama 3 (Gat y Ananthanarayan, 2015).



**Figura 20.** Snacks (Gutiérrez, 2018).



**Diagrama 3.** Proceso para la elaboración de snacks (Bouvier y Campanella, 2014).

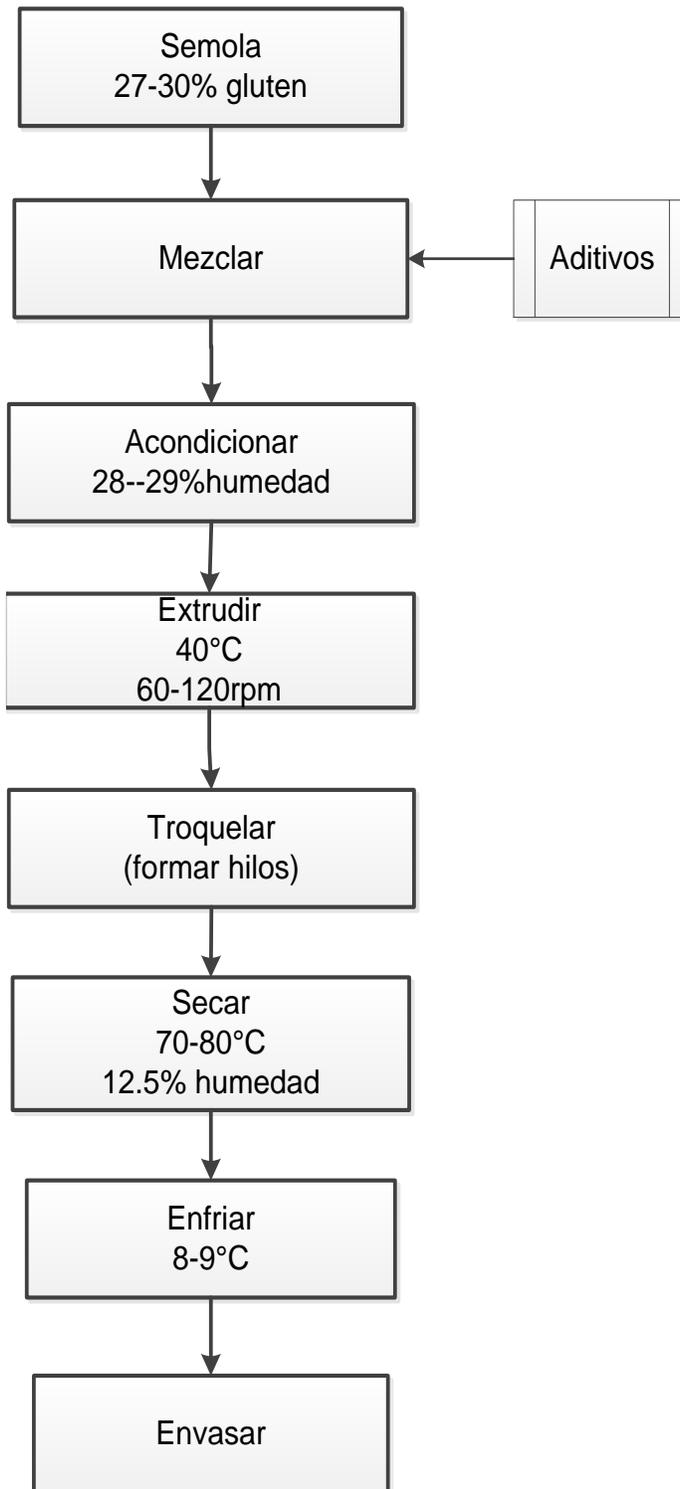


**Figura 21.** Formas de snacks (Perkings, 2014).

#### **4.2.3. PASTA**

La pasta es una de las fuentes más comunes de carbohidratos, hay pasta instantánea, la cual requiere rehidratación con agua hirviendo, pasta precocida con una etapa de cocción y un alto grado de la gelatinización del almidón, entre otros, en el diagrama 4 se observa su proceso de elaboración. Las formas del producto son diversas, las hay largas y cortas (figura 22). Se pueden utilizar diferentes variedades de trigo, harina de trigo blando, sémola, diversas granulometrías, otras fuentes de almidón tales como harinas de leguminosas, de arroz y de maíz. Se pueden utilizar múltiples aditivos (Aztaíza *et al.*, 2010).

- a) La norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008 establece las disposiciones y especificaciones sanitarias para el proceso de las harinas de cereales, sémolas o semolinas, alimentos preparados a base de cereales, de semillas comestibles, de harinas, de sémolas o semolinas entre otros, nos indica en el requisito 3.48 que la pasta es un producto obtenido por el amasado mecánico de sémola, semolina, harinas o cualquier combinación de estas procedentes de trigos con agua y otros ingredientes opcionales permitidos, moldeado, laminado o extruído y sometido o no a un proceso térmico de desecación (DOF, 2008).



**Diagrama 4.** Proceso para la elaboración de pasta tipo espagueti (Gutiérrez, 2014).



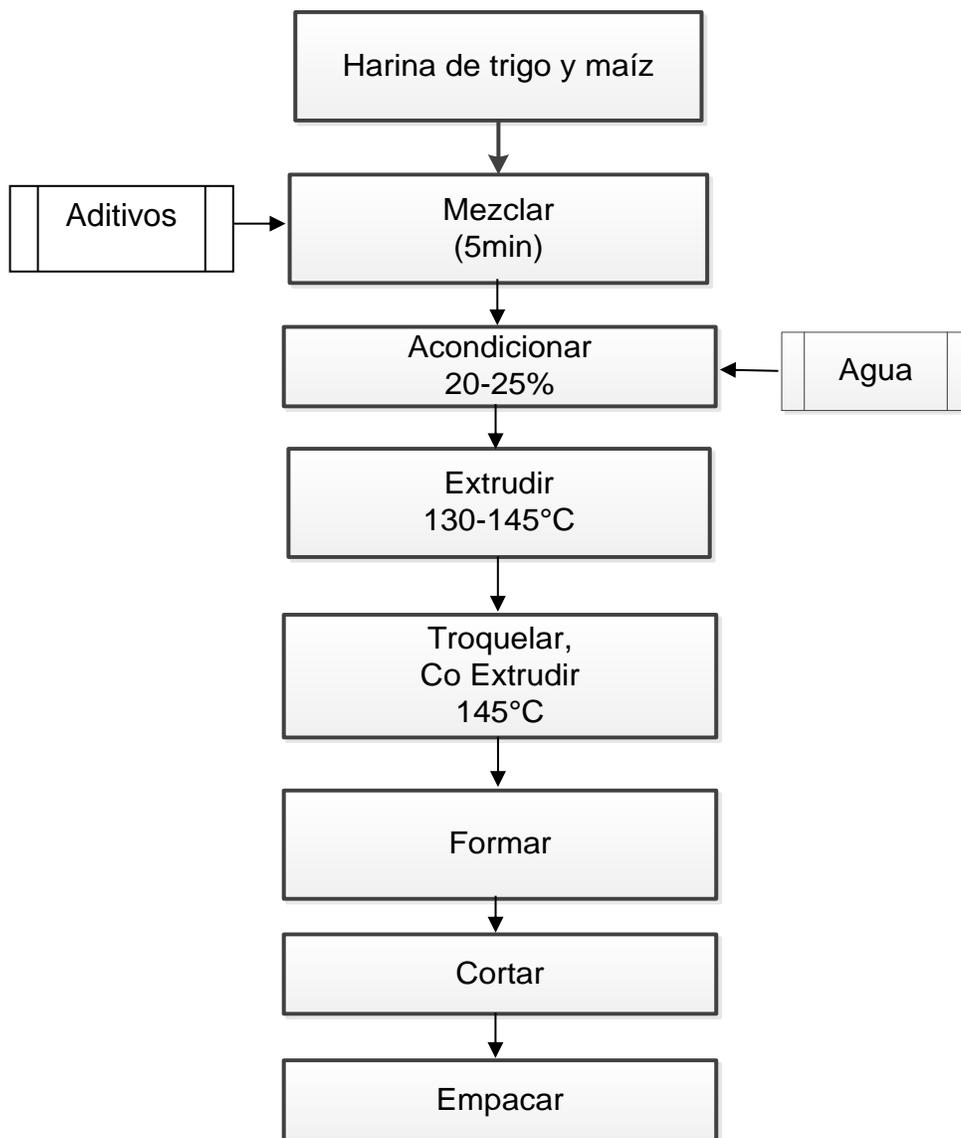
**Figura 22.** Pasta lista para su consumo (Bonilla, 2016).

#### **4.2.4. ALMOHADAS CON RELLENO**

En los últimos años, la producción de productos rellenos se ha vuelto muy popular, como el cereal en forma de almohada con un sabroso relleno, elaborada por el proceso de Co extrusión (ver 2.3.3), este cereal es atractivo para los niños (Figura 23). En el diagrama 5 se describe el proceso de elaboración para almohadas rellenas (Perkins, 2015).



**Figura 23.** Muestras de almohadas rellenas (Lasfor, 2014).



**Diagrama 5.** Proceso para la elaboración de almohadas rellenas (Moscicki, 2011).

#### 4.2.5. CONFITERÍA

Se pueden considerar como productos de confitería aquellos que contienen como ingrediente principal el azúcar (sacarosa) y otros azúcares comestibles (glucosa y fructosa) junto con productos alimenticios como harinas, huevo, grasa, aceites, chocolate, goma arábica, almidones, jarabe de glucosa, entre otros; los cuales se someten a un tratamiento térmico. Se pueden distinguir como productos de confitería: dulces de azúcar, caramelos con almendras, confitería gelificada, gomitas, entre otros (figura 25) (García y Masip, 2018).

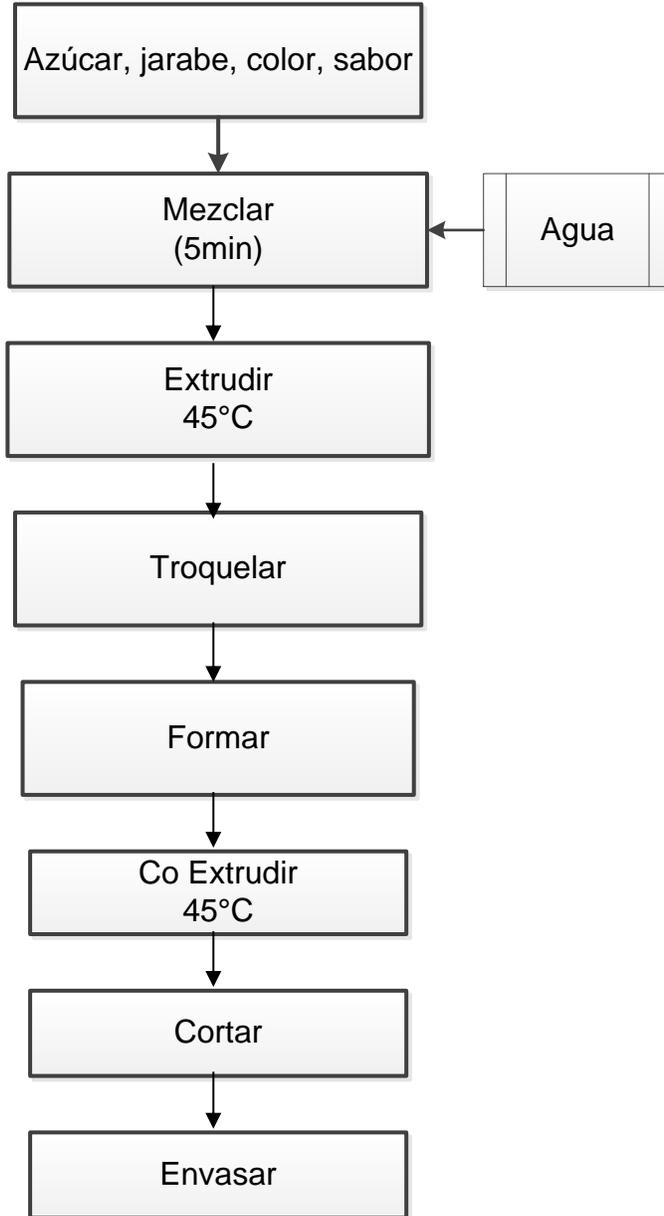
Para la elaboración de dulces en forma de trenza se utilizan extrusores de doble tornillo para formar la plastificación al aplicar calor en el equipo y las materias primas utilizadas generalmente son almidón de maíz, grenetina y azúcar (Diagrama 6). En la elaboración de gomitas se puede utilizar un equipo extrusor de tornillos de bajo cizallamiento, se inyecta vapor en el cilindro, se genera un alto grado de gelatinización, los gránulos de almidón se hinchan y presentan baja viscosidad durante el procesamiento con una textura flexible (Diagrama 7) (figuras 26 y 27). Hay productos de confitería funcionales, los cuales se les agrega un ingrediente funcional para que sean nutritivas, un ejemplo es la gomita con hierro, reducido en azúcar. En los extrusores para elaborar caramelo (figura 24) no se aplica cocción durante el proceso, la mezcla es forzada para transportarse en el tornillo a través del barril y en la salida del equipo se encuentra instalado un troquel para formar una cuerda con azúcar de textura plástica, posteriormente pasa por un co-extrusor donde se obtienen tiras de caramelo, se ajusta el cortador obteniendo caramelos de un tamaño específico (Hartel *et al.*, 2018).



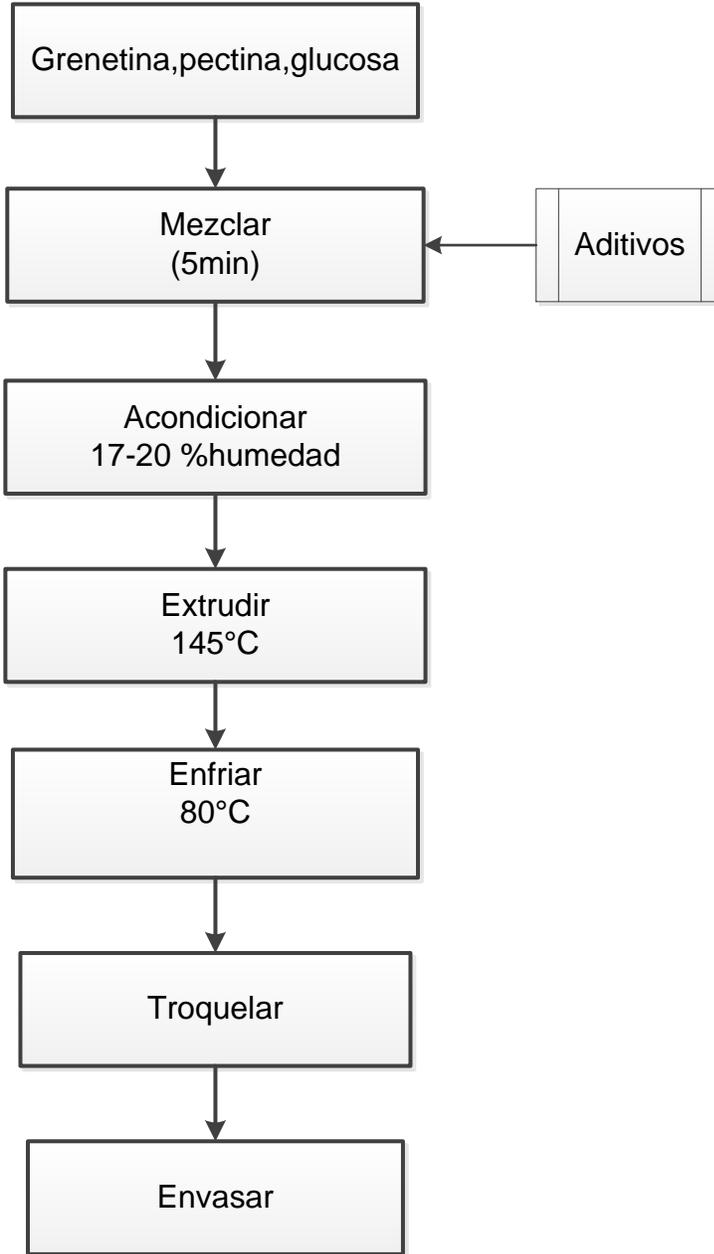
**Figura 24.** Extrusión de caramelos duros (Belt, 2019).



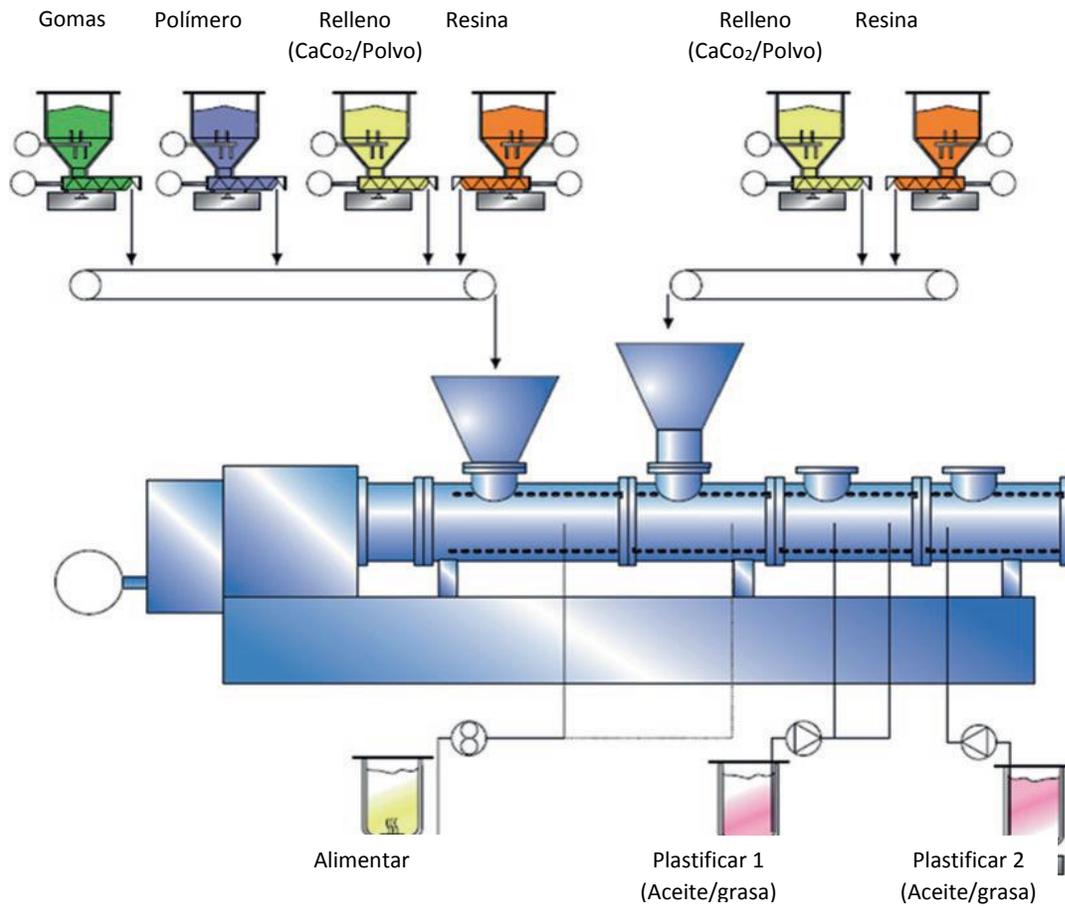
**Figura 25.** Productos de confitería procesados por extrusión (Madera *et al.*, 2014).



**Diagrama 6.** Proceso para la elaboración de caramelos (Bringas y Pino., 2012).



**Diagrama 7.** Proceso para la elaboración de gomitas (Aguilar *et al.*, 2018).



**Figura 26.** Proceso continuo de elaboración de gomitas por extrusión (Hartel *et al.*, 2018).



**Figura 27.** Gomitas extrudidas (Alfaro, 2019).

#### **4.2.6. ENCAPSULACIÓN**

Los procesos de encapsulación empezaron a desarrollarse entre 1930 y 1940 por la National Cash Register (NCR), en Ohio, EEUU, para la aplicación comercial de un tinte a partir de gelatina como agente encapsulante. En la industria alimentaria, este es una tecnología reciente y es un proceso económico. Este proceso permite, en función de la tecnología aplicada, encapsular nutrientes para que no sean afectados, degradados u oxidados, también a enzimas o células completas, permitiendo que sustratos y productos, entren y salgan de la cápsula. La microencapsulación por extrusión, involucra el paso de una emulsión del material activo y el material pared a través de un dado a alta presión. La extrusión constituye el segundo proceso más usado, después del secado por aspersion, para la encapsulación de sabores. Un proceso típico involucra la mezcla de sabores con jarabe de maíz o almidón modificado caliente, extruyendo la mezcla en forma de esferas de pequeño tamaño, dentro de un baño con un disolvente frío como el isopropanol. El disolvente frío solidifica el jarabe en un sólido amorfo, bañando los sabores. Los sabores tienen así una mayor vida de anaquel. La vitamina C y los colorantes pueden tener una vida de almacenamiento superior a dos años, ya que se protegen de la oxidación. Además, la forma sólida de los sabores es más conveniente para su uso. La aplicación de este método en el procesamiento de alimentos incluye bebidas, pasteles, gelatinas o postres (Eroski consumer, 2006).

La técnica de microencapsulación por extrusión tradicional es con alginato, se lleva a cabo por mecanismos de gelificación, debido a la uniformidad de las microcápsulas. El alginato es un polímero empleado para formar una matriz versátil, compatible y no tóxica para la protección de componentes activos, células o microorganismos sensibles al calor y pH, entre otros factores que se presentan durante el proceso de extrusión. La técnica consiste en formar gotas con solución de alginato con un goteo controlado sobre los componentes a encapsular en el proceso de extrusión (Lupo, 2015).

### 4.3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS

Una de las propiedades más importantes de los productos extrudidos es la textura, la cual estará muy relacionada con la expansión. La expansión del producto ocurre en las direcciones longitudinal y radial. El volumen específico surge de relacionar el diámetro, la longitud y el peso de los productos de extrusión (Falfán *et al.*, 2014).

Para los productos expandidos, el consumo específico de energía mecánica es un buen indicador del grado de cocción, ya que representa la energía mecánica transmitida al material. A mayor energía mecánica transmitida al material, mayor será la intensidad de las transformaciones del almidón. Sin embargo, la destrucción de la estructura cristalina y granular, aumenta el grado de cocción, la expansión crece hasta un valor máximo, a partir del cual ésta disminuye, como consecuencia de la disminución de la elasticidad. La temperatura también se relaciona directamente con el grado de cocción, y por ende la expansión mostrará un máximo con la temperatura. En cuanto a la dureza sensorial, disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que aumenta con el aumento de la humedad (Da Silva *et al.*, 2017).

La evaluación y tecnología de los productos extrudidos toma en cuenta varios factores, tales como: Densidad aparente, índice de expansión, índice de solubilidad de agua (WSI) y el índice de absorción de agua (WAI). El índice de absorción de agua aumenta a temperaturas entre 135 y 225°C, a menor contenido de humedad será mayor el tamaño del extrudido. Con un contenido bajo de amilosa y temperaturas de proceso entre 135-225°C disminuye la solubilidad, en general, de los productos de cereales extrudidos. Las propiedades del extrudido se pueden determinar por la unión de la amilosa con ácidos grasos o monoglicéridos (Yu *et al.*, 2012).

#### 4.3.1. DENSIDAD APARENTE

Prueba para determinar eficiencia y calidad del producto de extrusión, entre menos denso sea este será de mejor calidad, teniendo mayor expansión y textura.

Se utiliza un recipiente de volumen y peso conocido, en el cual se adiciona el producto extrudido, mediante diferencias de pesos y el volumen del recipiente se obtiene el valor de la densidad utilizando la ecuación siguiente:

$$\rho = \frac{(P_{me} - P_r)}{v} = \frac{g}{mL}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad aparente ( $\frac{g}{mL}$ )

$P_{me}$ : Peso del recipiente más el peso del producto extrudido (g)

$P_r$ : Peso del recipiente vacío (g)

$v$ : Volumen del recipiente (mL)

(Bansal *et al.*, 2017).

#### 4.3.2. ÍNDICE DE EXPANSIÓN

Determinar el índice de expansión permite tener una idea de la textura y calidad de los productos extrudidos a base de almidón, se determina relacionando los diámetros del producto expandido y la boquilla del dado del extrusor, utilizando la siguiente ecuación:

$$E = \frac{D^2}{d^2}$$

Donde:

D: Diámetro del producto extrudido (mm)

d: Diámetro de la boquilla del dado (mm)

E: Índice de expansión

(Horvat y Schuchmann., 2012).

### 4.3.3. INDICE DE SOLUBILIDAD Y ABSORCIÓN DE AGUA

El índice de solubilidad de agua está relacionado con la cantidad de sólidos solubles en una muestra seca, permitiendo verificar el grado de severidad del tratamiento de extrusión, por la degradación, la gelificación y la posterior solubilización del almidón. El aumento de solubilidad se atribuye a la dispersión de las moléculas de amilosa y de amilopectina, además de la formación de compuestos de bajo peso molecular. Por otro lado, el índice de absorción de agua depende de la disponibilidad de los grupos hidrófilos (-OH) en la unión a moléculas de agua y la capacidad de formar geles, a continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas:

$$ISA = \frac{Mre}{Ma} * 100$$

$$IAA = \frac{Mrc}{Ma - Mre}$$

Donde:

ISA: índice de solubilidad en agua

IAA: índice de absorción de agua

Mre: masa del residuo al evaporar (g)

Ma: masa de la muestra extrudida (g)

Mrc: masa del residuo al centrifugar (g)

(Ocaña, 2013).

#### 4.3.4. SEGURIDAD DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS

La aplicación de tiempo y temperatura en el proceso de extrusión inactiva la mayoría de enzimas. Respecto a los microorganismos resistentes al calor, en pruebas realizadas a 165°C en un tiempo de proceso de 80 segundos, en el cual se inocularon en la mezcla de cereales como control a los microorganismos termoresistentes: *Bacillus stearothermophilus* y *Geobacillus stearothermophilus*, de las cuales no quedaron esporas viables después de la extrusión; así mismo no se detectaron micotoxinas. Existe el riesgo de la producción de compuestos tóxicos durante la extrusión al aplicar altas temperaturas, uno de ellos es la acrilamida por reacciones de Maillard. Por ejemplo, en alimentos como papas fritas y cereales para desayuno, los cuales contienen asparagina (Roos y Livney, 2017).

#### 5. REGULACIÓN DE EXTRUDIDOS

En las normas mexicanas la información de productos extrudidos es limitada, se hace mención de algunas generalidades acerca de estas normas:

- a) La norma **NOM-187-SSA1/SCFI-2002**, Productos y servicios. Masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración y establecimientos donde se procesan. Especificaciones sanitarias. Información comercial. Métodos de prueba, se habla de las materias primas de productos extrudidos, excluyen el producto tipo botana (DOF, 2002).
- b) La norma **NMX-800- SCFI-2017**, Alimentos- proteína texturizada de soya- especificaciones, información comercial y métodos de prueba, establece especificaciones que deben cumplir los texturizados de soya (proteína de soya texturizada) elaborados a partir de productos proteicos de soya (Secretaría de economía, 2017).
- c) La norma **NOM-247-SSA1-2008**, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o

sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba. En esta no son objeto, las botanas y los alimentos a base de cereales para lactantes y niños de corta edad. Esta Norma Oficial Mexicana establece los nutrimentos que se deben adicionar y restituir en las harinas de trigo y de maíz nixtamalizado y su nivel de adición, exceptuándose las utilizadas para: frituras, como texturizantes o espesantes y base para harinas preparadas (DOF, 2008).

- d) La norma **NMX-F-023-S-1980**. Pasta de harina de trigo y/o semolina para sopa y sus variedades. Normas mexicanas. Dirección general de normas, incluye productos extrudidos tipo pasta (Colpos, 1980).

Acerca de la normativa mexicana no se encontraron más documentos de regulación que los antes mencionados, internacionalmente se encontró la norma general para los productos proteínicos vegetales (PPV) CXS 174-1989, indica cuando calificar un producto texturizado, aplicado a productos proteínicos vegetales, descrito en el punto 8.1.4 de esta norma (CODEX, 1989). Así mismo se revisaron las NORMAS DE EE.UU., NORMAS ISO, 2020, sin encontrar información adicional. Por lo que se puede opinar que a nivel mundial no existen las normas necesarias para controlar e indicar la calidad de los productos extrudidos en alimentos, se consideraría necesario realizar normativas específicas para tener parámetros estandarizados de calidad como fisicoquímicos y microbiológicos.

## CONCLUSIONES

- El proceso de extrusión en alimentos es muy versátil, ya que se pueden transformar materias primas como cereales y leguminosas, obteniendo una variedad de productos de diferentes formas y texturas.
- El tipo de configuración del tornillo en el extrusor tiene influencia en el producto extrudido final.
- En México, el maíz y trigo son los cereales más producidos, siendo también los más utilizados para elaborar productos extrudidos.
- La composición de las materias primas influye en la calidad del producto extrudido final, por las reacciones químicas que se llevan a cabo.
- La encapsulación por extrusión es una técnica para alargar vida útil de sabores y aceites, su uso se ha incrementado en los últimos años y tiene gran potencial de aplicación.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Adedeji, K. (2016). Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering*. 6, 149-168.
- 2) Aguilar, G. Baéz, J. Gallardo, C. García, K. Furías, M. Bautista M. Castillo, S. (2018). Estudio del Efecto de Hidrocoloides en el Control de la Actividad Acuosa en Gomitas Funcionales. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 3, 588-594.
- 3) Aguilera, J., Barbosa, G., Simpson, R., Welti, J. (2011). *Food Engineering Interfaces*. Londres: Springer.
- 4) Aguilera, J., Lillford, P. (2008). *Food Materials Science*. Santiago, New York: Springer.
- 5) Ahmed, K., Shoaib, M., Akhtar, M., Iqbal, Z. (2014). Chemical analysis of different cereals to access nutritional components vital for human health. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 6,61-67.
- 6) Ai, Y., Cinchy, K., Harte, J.B., Kelly, J.D y Ng, P.K.W. (2016) Effects of extrusion cooking on the chemical composition and functional properties of dry common bean powders. *Food Chemistry*, 211,538-545.
- 7) Alimentos Transgénicos. (2020). *Soya transgénica, definición, importancia, tipos e inconvenientes*. [En línea]. (Actualizado al 2020). Disponible en: <https://alimentostransgenicos.info/soya/> [Último acceso 23 de marzo de 2020].
- 8) Apráez, E., Calderon, D., Guerrero, L. (2017). Valoración Nutricional y productiva de diferentes granos de cereales germinados. *AgroSur*, 45(2),11-19.
- 9) Arendt, E., Zannini, E. (2013). *Cereal Grains for the Food and Beverage Industries*. Sawston Cambridge: Woodhead Publishing.

- 10) Aztaíza, M. Ruíz, L. Elizalde, A. (2010). Elaboración de pastas alimenticias enriquecidas a partir de harina de quinua (*Chenopodium quinua wild.*) y zanahoria (*Daucus carota*). *Facultad de Ciencias agropecuarias*, 8(1), 44-53.
- 11) Badui, S., (2012), *La ciencia de los Alimentos en la práctica*, Estado de México: Pearson Educación.
- 12) Bansal, V., Premi, M., Sharma, H., Nanda,V.(2017). Compositional, physical, functional attributes and flow characterization of spray-dried skim milk powder enriched with honey. *Food Measure*. 11,1474–1485.
- 13) Barallat, I. (2017). Harinas extruidas en la industria alimentaria. Trabajo fin de grado. Facultad de Farmacia, Universidad Complutense.
- 14) Bauser, M., Sauer, G., Siegert, K. (2006). *Extrusion*. (2). Dusseldorf: ASM International.
- 15) Barbosa, G., Ortega, E., Juliano, P., Yan, Hong. (2005). *Food Powders. Physical properties, processing and functionality*. New York: Springer.
- 16) Belt, E. (2019). Extrusión de caramelos duros. [En línea]. (Actualizado al 2019). Disponible en:  
<https://www.pinterest.com.mx/pin/78813062201888517/>. [Último acceso 23 de marzo de 2020].
- 17) Bonavia, D. (2013). *Maize. Origin, Domestication, and its role in the development of culture*. New York: Cambridge University Press.
- 18) Bonilla, M. (2016). *Pasta lista para consumo*. [En línea]. (Actualizado al 26 de julio de 2016). Disponible en:  
[https://www.elespanol.com/cocinillas/recetas/pasta-y-arroz/20160726/bueno-echar-aceite-agua-cocer-pasta/1000571992796\\_30.html](https://www.elespanol.com/cocinillas/recetas/pasta-y-arroz/20160726/bueno-echar-aceite-agua-cocer-pasta/1000571992796_30.html). [Último acceso 25 de marzo de 2020].

- 19) Borah, A., Mahanta, L., Kalita, D. (2016). Optimization of process parameters for extrusion cooking of low amylose rice flour blended with seeded banana and carambola pomace for development of minerals and fiber rich breakfast cereal. *Journal of food science technology*. 53, 221-232.
- 20) Botanical-online, (2019), *Partes del grano*. [En línea]. (Actualizado al 2019). Disponible en:  
<https://www.botanical-online.com/alimentos/cereales-partes-grano> [Último acceso 28 de noviembre del 2019].
- 21) Bouvier, J., Campanella, O. (2014). *Extrusion processing technology*. Chichester: Wiley Blackwell.
- 22) Bringas, M., Pino, J. (2012). *Microencapsulación de saborizantes mediante secado por atomización*. La Habana: Recitela
- 23) Briseño, M., (2005). Agentes encapsulantes y técnicas de encapsulación en la industria alimentaria. Tesis para obtener el título de Ingeniero en alimentos. Facultad de estudios superiores Cuautitlán, UNAM.
- 24) Cabezas, C., Hernández, B., Vargas, M., (2016). Azúcares adicionados a los alimentos: efectos en la salud y regulación mundial. Revisión de la literatura. *Revista Facultad de Medicina*. 64 (2), 319-329.
- 25) Carrasco, N., Zamora, M., Melin, A. (2011). *Manual de Sorgo*. Buenos Aires: Publicaciones Regionales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- 26) Castro, Y. (2014). Evaluación de la protección de diferentes matrices de almidón modificado como materiales encapsulantes durante la extrusión termoplástica de compuestos de sabor encapsulados. Tesis para obtener grado de maestría en tecnología avanzada, CICATA, Instituto Politécnico Nacional.

- 27) Cheng, H., Hansen, J. (2016). Extrudate expansion model in a twin-screw extrusion cooking process considering melt rheological property. *Food bioprocess technology*. 9, 604-611.
- 28) Cheung, P., Metha, B. (2015). *Handbook of food chemistry*. New York: Springer.
- 29) Circuito productivo, (2018), *Trigo*. [En línea]. (Actualizado al 2018).  
Disponible en:  
<https://circuitoproductivo.com/trigo/> [Último acceso 28 de noviembre del 2019].
- 30) CLEXTRAL, (2020), *Extrusores de doble tornillo en contra-rotación*. [En línea]. (Actualizado al 2019). Disponible en:  
<https://www.clextral.com/es/tecnologias-lineas/tecnologias-y-procesos/extrusion-de-doble-tornillo-caracteristicas-y-beneficios/> [Último acceso 29 de noviembre del 2019].
- 31) Cueto, M, (2016). Transformaciones físico-químicas de granos de maíz en la elaboración de laminados y extrudidos para el desayuno. Tesis presentada para optar al título de Doctor. Departamento de Industrias. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires.
- 32) Cui, S. W. (2005). *Food Carbohydrates. Chemistry, physical properties and applications*, New York: CRC Press.
- 33) Da Silva, C. Madeira, E. Hidalgo, D. Wanderlei, C. Ramírez, J. (2017). Effects of whey protein concentrate, feed moisture and temperature on the physicochemical characteristics of a rice-based extruded flour. *Food Chemistry*. 228, 287–296.
- 34) De León, O. (2012). *En cultivo de sorgo*. Memorias de experiencias profesionales para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Horticultura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

- 35) Dlubal. (2020). *Normativa de Estados Unidos (AISC, ACI, AWC, ADM, ASCE 7, IBC)*. [En línea]. (Actualizado al 2020). Disponible en: <https://www.dlubal.com/es/soluciones/normativa/normativa-de-estados-unidos-aisc-aci-awc-ibc> [Último acceso marzo del 2020].
- 36) DOF, (2008), *NOM-247-SSA1-2008*. [En línea]. (Actualizado el 10 de mayo de 2011). Disponible en: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5188649&fecha=10/05/2011](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5188649&fecha=10/05/2011) [Último acceso 30 de enero del 2020].
- 37) Eliasson, A. (2006). *Carbohydrates on food*. (2). New York: CPR Press.
- 38) Emin, M., Teumer, T., Schmitt, W., Radle, M., Schuchmann, H. (2016). Measurement of the true melt temperature in a twin-screw extrusion processing of starch-based matrices via infrared sensor. *Journal of food engineering*. 170, 119-124.
- 39) Engormix, (2017), *Extrusor autógeno sin calentamiento o enfriamiento*. [En línea]. (Actualizado al 2017). Disponible en: <https://www.engormix.com/balanceados/articulos/los-efectos-extrusion-ingredientes-t40771.htm> [Último acceso 29 de noviembre del 2019].
- 40) Eroski consumer, (2006), *La encapsulación en los alimentos*. [En línea]. (Actualizado el 26 de abril de 2006). Disponible en: <https://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/la-encapsulacion-en-alimentos.html> [Último acceso 31 d enero del 2020].
- 41) Falfán, R. Verdalet, I. Martínez, F. (2014). Effects of Some Extrusion Variables on Physicochemical Characteristics of Extruded Corn Starch-passion Fruit Pulp (*Passiflora edulis*) Snacks. *Plant foods human nutrition*. 69,365–371.
- 42) FAO, (2019), *Situación alimentaria mundial*. [En línea]. (Actualizado en marzo 2019). Disponible en:

<http://imagenagropecuaria.com/2018/mexico-tendra-importacion-record-de-maiz-fao/> [Último acceso 15 de marzo del 2019].

- 43) FAO, (2020), *Situación alimentaria mundial*. [En línea]. (Actualizado al 5 de marzo del 2020). Disponible en:  
<http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/> [Último acceso 23 de marzo del 2020].
- 44) FAO y OMS. (2007). *Cereales, legumbres, leguminosas y productos proteínicos vegetales*. Roma: CODEX ALIMENTARIUS.
- 45) Fellows, P. (2017). *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 3, Duxford: Woodhead Publishing.
- 46) García, J. Masip, F. (2018). *Elaboración de confitería y otras especialidades*. España: Síntesis.
- 47) Gat, Y. Ananthanarayan, L. (2015). Effect of extrusion process parameters and pregelatinized rice flour on physicochemical properties of ready-to-eat expanded snacks. *Journal food science technology*. 52(5), 2634–2645.
- 48) Gatzweiler, F., von Braun J. (2016). *Technological and Institutional Innovations for Marginalized Smallholders in Agricultural Development*. New York: Springer.
- 49) Geetha, R., Mishra, H., Srivastav, P. (2014). Twin screw extrusion of kodo millet-chickpea blend process parameter optimization, physico-chemical and functional properties. *Journal food science technology*. 51(11), 3144–3153.
- 50) Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. (2). New York: Springer.
- 51) Gil, A. (2010). *Tratado de Nutrición. Tomo II Composición y calidad nutritiva de los alimentos*. (2) Madrid. Médica Panamericana.

- 52) Gómez, P., Aquino, E., Martínez, F., Verdalet, I. (2013). Los alimentos extrudidos están por todos lados. *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad veracruzana*, 26.
- 53) Gómez, P. (2013). Obtención de productos directamente expandidos por extrusión y botanas de 3ª generación a base de chíá y almidón de maíz resistente AR4. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias Alimentarias. Instituto de Ciencias básicas, Universidad Veracruzana.
- 54) Greenpeças, (2016), *Extrusor condiciones isotérmicas y autógenas*. [En línea]. (Actualizado al 2016). Disponible en:  
<http://www.greenpeças.com.br/products/extrusora-racao> [Último acceso 29 de noviembre del 2019].
- 55) Greenpeças, (2016), *Extrusor isotérmico*. [En línea]. (Actualizado al 2016). Disponible en:  
<http://www.greenpeças.com.br/products/extrusora> [Último acceso 29 de noviembre del 2019].
- 56) Grijalva, R., Robles, F., Macias, R., Santillano, J., Núñez, F. (2016). Nitrógeno en trigo y su efecto en el rendimiento y en la concentración de nitratos y potasio en el extracto celular del tallo. (ECT). *Acta Universitaria*. 26(5), 48-54.
- 57) Gulati, P., Weier, S., Santra, D., Subbiah, J., Rose, J. (2016). Effects of feed moisture and extruder screw speed and temperature on physical characteristics and antioxidant activity of extruded proso Millet (*Panicum miliaceum*) flour *International Journal of Food science and technology*. 51, 114-122.
- 58) Gutiérrez, E. (2014). Diseño para la optimización del proceso de corte y enrollado durante la elaboración de pasta fresca. Obtención de Grado académico de Licenciatura de Diseñadora Industrial, Guatemala.

- 59) Gutiérrez, P. (2018). *Snaks tipo cheto*. [En línea]. (Actualizado al 19 de marzo de 2020). Disponible en:  
<https://foodandwineespanol.com/de-que-estan-hechos-los-cheetos/>.  
[Último acceso 16 de marzo de 2020].
- 60) Haroon, M., Farhan, M., Sarwar, M., Ahmad, N., Moghal, S. (2013). The importance of cereals (Poaceae: Gramineae) nutrition in human health: A review. *Academic journals*. 4(3), 32-35.
- 61) Hartel, R., Von Elbe, J., Hofberger, R. (2018). *Confectionery Science and Technology*. Cham: Springer.
- 62) Hernández, N., Reyes, N., González, F., Nuñez, F., Cooper, B. (2015). Importancia de las proteínas de almacenamiento en cereales (prolaminas). *Vertientes revista especializada en ciencias de la salud*. 18, 3-7.
- 63) Hettiarachchy, N., Sato, K., Marshall, M., Kannan, A. (2012). Bioactive food proteins and peptides. *Applications in Human health*. New York: CRC Press.
- 64) Horvat, M. Schuchmann, H. (2013). Investigation of Growth and Shrinkage Mechanisms in Vapor-Induced Expansion of Extrusion-Cooked Corn Grits. *Food bioprocess technology*. 6, 3392–3399.
- 65) IBH, (2020), *Extrusor de doble tornillo co-rotación*, [En línea]. (Actualizada en enero de 2020). Disponible en:  
<http://bartolihnos.com.ar/producto.php?id=274> [Último acceso 29 de noviembre del 2019].
- 66) Imagen agropecuaria, (2018), *México tendrá importación récord de maíz*. [En línea] (Actualizada el 11 de julio del 2018). Disponible en:  
<http://imagenagropecuaria.com/2018/mexico-tendra-importacion-record-de-maiz-fao/> [Último acceso 15 de marzo de 2019].
- 67) Jovanca, L., Duragic, O., Sredanovic, S. (2010). Extrusion technology in feed and food processing, *Institute for food technology*. 1-61.

- 68) Jozinovic, A., Subaric, D., Ackar, D., Babic, J., Milicevic, B. (2016). Influence of spelt flour addition on properties of extruded products based on corn grits. *Journal of Food Engineering*. 172, 31-37.
- 69) Juárez, Z. N., Bárcenas, M. E., y Hernández, L. R. (2014). El grano de trigo: Características generales y algunas problemáticas y soluciones a su almacenamiento. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*. 8(1), 79-93.
- 70) Jucha Martin fotos, (2019), *Maíz entero*. [En línea]. (Actualizada al 2019). Disponible en:  
[https://es.123rf.com/photo\\_62056701\\_mazorcas-de-ma%C3%ADz-entero-en-la-pizarra-oscura.html](https://es.123rf.com/photo_62056701_mazorcas-de-ma%C3%ADz-entero-en-la-pizarra-oscura.html) [Último acceso 28 de noviembre del 2019].
- 71) Kaczmarek, J., Miśkiewicz, K., Nebesny, E., Makowski, B. (2015). Composition and functional properties of lipid components from selected cereal grains. *Research signpost*. 661 (2), 119-145.
- 72) Kaur, G., Rehal, J., Singh, A., Singh, B., Kaur, A. (2014). Optimization of extrusion parameters for development of ready-to-eat breakfast cereal using RSM, *Asian journal dairy and food research*. 33(2), 77-86.
- 73) Kaur, S., Sharma, S., Singh, B., Dar, B. (2015). Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans. *Journal food science technology*. 52(3), 1670-1676.
- 74) Keawpeng, I., Charunuch, C., Roudaut, G. Meenune, M. (2014). The optimization of extrusion condition of Phatthalung Sungyod rice extrudate: a preliminary study. *International Food research journal*. 21(6), 2399-2304.
- 75) Korkerd, S., Wanlapa, S., Puttanlek, CH., Uttapap, D., Rungsardthong, V. (2016). Expansion and functional properties of extruded snacks enriched. *Journal food science technology*. 53(1), 561–570.

- 76) Kristiawan, M., Chaunier, L., Della Valle, G., Ndiaye, A., y Vergnes B. (2016). Modeling of starchy melts expansion by extrusion. *Trends in Food Science & Technology*. 48,13-26.
- 77) Lasfor, S. (2014). Almohadas rellenas. [En línea]. (Actualizado enero 2019). Disponible en:  
[http://www.lasfor.com.ar/?seccion=p\\_almohaditas](http://www.lasfor.com.ar/?seccion=p_almohaditas). [Último acceso 24 de marzo del 2020].
- 78) León, A., Rosell, C. (2007). *De tales harinas, tales panes. Granos, harinas y productos de panificación Iberoamericana*. Córdoba: Hugo Báez.
- 79) Lifeder. (2020), *13 tipos de cereales y sus características*. [En línea]. (Actualizado al 2020). Disponible en:  
[Lifeder.com/tipos de-cereales/](http://Lifeder.com/tipos-de-cereales/) [Último acceso 18 de marzo de 2020].
- 80) Llopart, E. (2011). Efectos de las condiciones de extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos extrudidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencia y tecnología de los alimentos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral.
- 81) Lupo, B., (2015), Estudio de la gelificación de alginatos para encapsulación: caracterización, preparación y aplicaciones en alimentos funcionales. Tesis para obtener el título de doctora en Ciencia y tecnología de materiales. Departamento de Ingeniería química, Facultad de Química, Universidad de Barcelona.
- 82) Madera, E. Tudela, M. Caballero, B. Fernández, J. Torres, J. (2014). Productos de confitería procesados por extrusión. [En línea]. (Actualizado marzo 2014). Disponible en:  
<https://techpress.es/categorizacion-de-productos-de-confiteria/>. [Último acceso 23 de marzo de 2020].

- 83) Manickavasagan, A., Santhakumar, C., Venkatachalapathy, N. (2017). *Brown rice*. Cham: Springer International Publishing.
- 84) Martín, Ch. (2016). Twin Screw Extruders as Continuous Mixers for Thermal Processing: A Technical and Historical Perspective. *AAPS Pharmaceutical science technology*. 17, 3-19.
- 85) Martínez, B., Ibáñez, M., Rincón, F. (2002). Ácido fólico: aspectos nutricionales e implicaciones analíticas. *Archivos latinoamericanos de Nutrición*. 52(3), 219-231.
- 86) Merkus, H., Meesters, G., (2016). *Production, handling and characterization of particulate materials*. Londres: Springer International.
- 87) Mine, Y., Li-Chan, E., Jiang, B. (2010) *Bioactive proteins and peptides as functional foods and nutraceuticals*. Iowa: Blackwell publishing, IFT presa.
- 88) Miransari, M. (2016). Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production Soybean Production. *Soybean production*, Londres: Academic Press.
- 89) Moretti, F., Mischán, M., Leonel, M. (2016). Instant blend from derivatives produced by extrusion. *Ciencia Rural, Santa María*. 46(3), 573-579.
- 90) Moscicki, L., (2011). *Extrusion-Cooking Techniques. Techniques theory and sustainability*, Alemania: Wiley-VCH.
- 91) Nakamura, Y. (2015). *Starch. Metabolism and structure*. Tokio: Springer.
- 92) Nedovic, V., Raspor, P., Levic, J., Tumbas, V., Barbosa, G. (2016). *Emerging and traditional technologies for safe, healthy and quality food*. New York, Springer.
- 93) Nielsen, S. (2017). *Food Analysis*. 5, Indiana: Springer.

- 94) Obradovic, V., Babic, J., Subaric, D., Ackar, D., Jozinovic, A. (2014). Improvement of nutritional and functional properties of extruded food products. *Journal of food and nutrition research*. 53 (3), 189-206.
- 95) Ocaña, D. (2013). Estudio del proceso de elaboración de arroz crocante por extrusión. Trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero, Facultad de Ciencias de la ingeniería, Alimentos. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- 96) Ojokoh, A., Yimin, W., Eromosele, O. (2015). Effect of some extrusion variables on fermented maize-soybean blend. *Journal food science technology*. 52(9), 5763–5771.
- 97) Olatunji, O. (2016). *Natural Polymers. Industry techniques and applications*. Switzerland, Springer.
- 98) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (2020), *Situación alimentaria mundial*. [En línea]. (Actualizado enero 2020). Disponible en:  
<http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/> [Último acceso 15 de marzo del 2019].
- 99) Ortega, R., Aparicio, A., Jiménez, A., Rodríguez, E. (2015). Cereales de grano completo y sus beneficios sanitarios. *Nutrición hospitalaria*. 32, 25-31.
- 100) Perkins, B. (2014) Formas de snaks. [En línea]. (Actualizado al 4 de noviembre de 2014). Disponible en:  
<https://www.foodmanufacture.co.uk/Article/2014/09/30/Coextruded-snacks-get-a-big-boost>.[Último acceso 22 de marzo de 2020].
- 101) Perrot, A., Mélinge, Y., Rangeard, D., Micaelli, F., Estellé., P., Lanos, Ch. (2012). Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behavior of high yield stress fluids at low strain rate. *Rheol Acta*. 51,743–754.

- 102) Pincioli, M. (2010). *Propiedades estructurales y funcionales*. Tesis para obtener el título de Maestro en Tecnología e higiene de los Alimentos. Programa de arroz. Facultad de Ciencias agrarias y forestales, CIDCA.
- 103) Plaza, J., Martínez, O., Gil., Hernández, A., (2013). Los alimentos como fuente de mono y disacáridos: aspectos bioquímicos y metabólicos. *Nutrición Hospitalaria*. 28(4), 5-16.
- 104) Porenta, J. (2019). *Hojuela de chocolate*. [En línea]. (Actualizado al 24 de marzo de 2020). Disponible en:  
  
[https://es.123rf.com/photo\\_4706818\\_bolas-de-chocolate-para-el-desayuno-en-el-plato-de-cer%C3%A1mica-aislado-en-blanco-.html](https://es.123rf.com/photo_4706818_bolas-de-chocolate-para-el-desayuno-en-el-plato-de-cer%C3%A1mica-aislado-en-blanco-.html). [Último acceso 20 de marzo de 2020].
- 105) Producción agrícola, (2018), *El sorgo y sus ventajas agronómicas*. [En línea]. (Actualizado al 2019). Disponible en:  
<https://www.traxco.es/blog/produccion-agricola/sorgo> [Último acceso 29 de noviembre del 2019].
- 106) Purnomo, E. (2019). *Copos de chocolate*. [En línea]. (Actualizado al 24 de marzo de 2020). Disponible en:  
[https://es.123rf.com/photo\\_2923686\\_copos-de-cereales-de-ma%C3%ADz-y-copos-de-chocolate.html](https://es.123rf.com/photo_2923686_copos-de-cereales-de-ma%C3%ADz-y-copos-de-chocolate.html). [Último acceso 20 de marzo de 2020].
- 107) Quilca, G., Balandran, R., Mendoza, A., Mercado, J. (2018) Propiedades y posibles aplicaciones de las proteínas de salvado de trigo. *Biotecnología y Ciencias Agropecuarias*. 12(2): 137-147.
- 108) Ramos, F. (2013). Maíz, trigo y arroz. Los cereales que alimentan al mundo. Monterrey, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- 109) Ramos, M., Romero, C., Bautista, S., (2018), Almidón modificado: Propiedades y usos como recubrimientos comestibles para la conservación

- de frutas y hortalizas frescas, *Revista Iberoamericana de tecnología postcosecha*. 19, 30-44.
- 110) Riaz , N. y Rokey, J. (2012). Extrusion problems solved. Food, pet food and feed. Nueva Delhi: Woodhead Publishing, págs. 20-30.
- 111) Roos, Y. H., Livney, Y. D. (2016). Engineering foods for bioactives stability and delivery. New York: Springer.
- 112) SAGARPA. (2017). *Cierre Estadístico de la Producción Agrícola 2017*. [En línea]. (Actualizado el 31 de mayo del 2018). Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/cierre-estadistico-de-la-produccion-agricola-2017?idiom=es> [Último acceso 30 de enero del 2019].
- 113) SAGARPA, (2017), *Planeación agrícola nacional 2017-2030. Sorgo de grano entero mexicano*. [En línea]. (Actualizado en 2017). Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256433/B\\_sico-Sorgo\\_Grano.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256433/B_sico-Sorgo_Grano.pdf) [Último acceso 21 enero de 2020].
- 114) Sarguini, F., Romano, A., Masi, P. (2016). Experimental Analysis and numerical simulation of pasta dough extrusion process. *Journal of food engineering*. 176, 56-70.
- 115) Sarwar, A., Haque, A., Yasmin, F. (2013). The usage of social network as a marketing tool: Malaysian muslim consumers' perspective. *International journal of academic research in economics and management science*. 2, 93-102.
- 116) Serna, S. (2013). *Química, almacenamiento e industrialización de los cereales*. Distrito Federal, México: AGT Editor.
- 117) Shan, S., Sulaiman, R., Sanny, M., Hanani, N. (2015). Effect of extrusion barrel temperatures on residence time and physical properties of various flour extrudates. *International food research journal*. 22(3), 965-972.

- 118) Shinde, Y., Gudekar, A., Chavan, P., Pandit, A., Joshi. (2016). Design and development of energy efficient continuous cooking system. *Journal of food engineering*. 231–239.
- 119) SIAP, (2019). *Avance de Siembras y Cosecha. Resumen por estado*. [En Línea]. (Actualizado al 2019). Disponible: [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do) [Último acceso febrero de 2020].
- 120) Singh, R., Heldman, D. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*. Zaragoza: Acribia.
- 121) Siribout, S. (2019). Hojuelas de maíz. [En Línea]. (Actualizado al 24 de marzo de 2020). Disponible en: [https://es.123rf.com/photo\\_26620503\\_peque%C3%B1a-muestra-de-cereal-en-hojuelas-de-ma%C3%ADz-aislado.html](https://es.123rf.com/photo_26620503_peque%C3%B1a-muestra-de-cereal-en-hojuelas-de-ma%C3%ADz-aislado.html) [Último acceso 20 de marzo de 2020].
- 122) Stolton, S., Dudley, N. (2014). *El crecimiento de la soja. Impactos y soluciones*. Gland: WWF.
- 123) Suarez, N., Ramos, Q., Guerra, A. (2016). Efecto de la extrusión-cocción en la formación de almidón resistente. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 36-41.
- 124) Tecnología de plásticos. (2011). *Extrusor de tornillo sencillo con componentes de flujo de arrastre*. [En línea]. (Actualizado al 2011). Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html> [Último acceso 29 de noviembre de 2019].
- 125) Telemadrid, (2014), *Arroz*. [En línea]. (Actualizado al 2014). Disponible en:

<http://www.telemadrid.es/noticias/proceso-cultivo-arroz-0-1555044523--20140312011738.html> [Último acceso 28 de noviembre del 2019].

- 126) Thomas, S., Visakh, P., Mathew, A. P. (2013). *Advances in Natural Polymers. Composites and nano composites*, New York: Springer.
- 127) Tovar, A. (2012). Caracterización física y mecánica de sémola de maíz extruída bajo diferentes condiciones de operación. Proyecto de grado para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad Simón Bolívar. Decanato de Estudios Profesionales, Coordinación de Ingeniería Química.
- 128) Uros Poteko, (2019), *Soya*. [En línea]. (Actualizado al 2019).  
Disponible en:  
<https://sp.depositphotos.com/186361410/stock-photo-young-soy-plant-germinating-from.html> [Último acceso 28 de noviembre del 2019].
- 129) Vargas, J. (2015). Análisis e implementación del proceso de fabricación para una película biodegradable empleada en empaques multicapa. Tesis para obtener en grado de Maestro en Ingeniería. Ingeniería mecánica, UNAM.
- 130) Villarroel, P., Gómez, C., Vera, C., Torres, J. (2018). Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos, *Revista chilena de nutrición*.45 (3), 30-45.
- 131) Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman, K., Faubion, J. (2015). *Encyclopedia of food grains*. (2), Langford Lane: Academic Press.
- 132) Yanniotis, S., Taoukis, P., G, N., y Karathanos, V. T. (2013). *Advances in Food Process Engineering Research and Applications*. New York: Springer.
- 133) Yu, L. Ramaswamy, H. Boye, J. (2012). Twin-screw Extrusion of Corn Flour and Soy Protein Isolate (SPI) Blends: A Response Surface Analysis. *Food bioprocess technology*. 5, 485–497.