

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

“DESARROLLO, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN  
SENSORIAL DE UNA BOTANA EXTRUIDA A BASE DE  
SORGO (*Sorghum bicolor* L. Moench) Y AMARANTO  
(*Amaranthus hypochondriacus*)”

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS**

PRESENTA

MANZO CAMPOS ADRIANA

DIRIGIDA POR

Dra. MARCELA GAYTAN MARTINEZ

CO-DIRIGIDA POR

Dra. AUREA KARINA RAMÍREZ JIMÉNEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

"DESARROLLO, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN  
SENSORIAL DE UNA BOTANA EXTRUIDA A BASE DE  
SORGO (*Sorghum bicolor* L. Moench) Y AMARANTO  
(*Amaranthus hypochondriacus*)"

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA  
MANZO CAMPOS ADRIANA

DIRIGIDA POR  
Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ  
CO-DIRIGIDA POR  
Dra. AUREA KARINA RAMÍREZ JIMÉNEZ

SINODALES

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ  
DIRECTOR

Dra. AUREA KARINA RAMÍREZ JIMÉNEZ  
CO-DIRECTOR

Dra. MARÍA DE LA LUZ REYES VEGA  
SINODAL

Dra. ROCIO CAMPOS VEGA  
SINODAL

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

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	1
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Problemas de salud y mortalidad en México	1
1.1.1 Dieta y balance energético	2
1.1.2 Factores socioculturales de la dieta y consumo de botanas	4
1.1.2.1 Botanas y su clasificación	4
1.1.3 Consumo y ventas de botanas en México	7
1.1.4 Tendencia de las industrias de las botanas	8
1.1.4.1 Almidón resistente	12
1.1.4.2 Índice glucémico	15
1.1.4.3 Productos libres de gluten	17
1.2 Sorgo	18
1.2.1 Generalidades	18
1.2.2 Producción de sorgo	20
1.2.3 Uso del sorgo y productos alimenticios	23
1.2.4 Composición química	26
1.2.5 Composición fitoquímica	29
1.2.6 Limitaciones del uso de sorgo en alimentos	32
1.3 Amaranto	35
1.3.1 Generalidades	35
1.3.2. Producción de amaranto	36
1.3.3. Composición química del amaranto	37
1.3.4 Composición fitoquímica del amaranto	40
1.3.5 Usos del amaranto	41
1.4 Fundamentos de extrusión	42

1.5 Nixtamalización	45
2. HIPÓTESIS	46
3. OBJETIVOS	47
3.1 General	47
3.2 Específicos	47
4. METODOLOGÍA	48
4.1 Materiales	49
4.2 Caracterización de la materia prima	49
4.2.1 Índice de impurezas del grano de sorgo	49
4.2.2 Determinación de la humedad del grano de sorgo	49
4.2.3 Peso hectolítrico	50
4.3 Preparación de la materia prima	50
4.3.1 Nixtamalización	50
4.3.2 Obtención de harina de sorgo nixtamalizado	50
4.3.3 Diseño experimental y condiciones de extrusión	51
4.3.4 Evaluación sensorial	53
4.4 Caracterización del producto	55
4.4.1 Análisis proximal	56
4.4.1.1 Grasa	56
4.4.1.2 Proteína	57
4.4.1.3 Humedad	58
4.4.1.4 Cenizas	58
4.4.1.5 Fibra dietética	59
4.4.1.6 Carbohidratos	60
4.4.2 Caracterización física	61
4.4.2.1 Textura	61
4.4.2.2 Color	61
4.4.3 Caracterización nutracéutica	62
4.4.3.1 Compuestos fenólicos	62
4.4.3.1.1 Extracción de fenoles libres y ligados	62
4.4.3.1.2 Determinación de fenoles totales	63
4.4.3.1.3 Flavonoides totales	64

4.4.3.1.4 Determinación de taninos condensados	64
4.4.3.1.5 Capacidad antioxidante DPPH	65
4.4.3.1.6 Capacidad antioxidante ABTS	66
4.4.3.2 Almidón resistente	67
4.5 Análisis estadístico	69
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
5.1 Caracterización del grano de sorgo	69
5.2 Preparación de la materia prima	70
5.2.1 Obtención de harina de sorgo nixtamalizado	70
5.2.2 Caracterización física del sorgo nixtamalizado	70
5.3 Optimización de la formulación del extruido de amaranto explotado y sorgo nixtamalizado	71
5.4 Caracterización física de las muestras	85
5.5 Evaluación sensorial	87
5.6 Caracterización del producto final y materia prima	92
5.6.1 Caracterización física	92
5.6.1 Caracterización física del producto y materia prima	93
5.6.2 Análisis proximal	95
5.6.3 Caracterización nutracéutica	107
5.6.3.1 Determinación de fenoles totales	107
5.6.3.2 Determinación de flavonoides	111
5.6.3.3 Determinación de taninos condensados	113
5.6.3.4 Determinación de la capacidad antioxidante	115
5.6.3.4.1 Método ABTS	115
5.6.3.4.2 Método DPPH	117
5.6.3.5 Almidón resistente	121
6 .CONCLUSIONES	124
7. REFERENCIAS	126
8. ANEXOS	147
ANEXO A. Formato de evaluación sensorial	147
ANEXO B Curvas de calibración	152

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Clasificación de botanas en base a su proceso de elaboración	5
2. Clasificación del almidón resistente	14
3. Formas de utilización del sorgo en India	25
4. Comparación de la composición nutrimental en 100 gramos de porción comestible de varios cereales con 12% de humedad	27
5. Composición proximal de sorgo rojo y blanco	28
6. Composición de minerales y vitaminas en el grano de sorgo	29
7. Componentes fenólicos y capacidad antioxidante en sorgo rojo y blanco crudo	31
8. Perfil de aminoácidos esenciales en el grano del sorgo y maíz	32
9. Clasificación botánica del amaranto cultivado	35
10. Aminoácidos esenciales del grano de amaranto	38
11. Comparación de la composición proximal entre los granos de amaranto con otros cereales	39
12. Efecto del explotado en algunos microelementos del amaranto	40
13. Contenido de fenoles totales, contenido de flavonoides totales y DPPH en <i>Amaranthus hypochondriacus</i> y <i>A. cruentus</i> L.	41
14. Diseño de experimentos de pruebas preliminares	52
15. Límites máximos microbiológicos y de materia extraña en botanas con chile y especias no irradiadas	53
16. Caracterización física del grano de sorgo	70
17. Rendimientos del procesamiento del sorgo	70
18. Caracterización del nejayote del sorgo	71
19. Propiedades de la masa y del producto terminado en cada una de las pruebas de optimización	72
20. Resultados de la evaluación de la dureza de los tratamientos de la primera prueba preliminar realizada	73

21. Resultado de la dureza de los tratamientos de la segunda prueba preliminar realizada	74
22. Dureza de los tratamientos de la tercera prueba preliminar realizada	76
23. Formulación final obtenida a partir de las pruebas preliminares para la elaboración de una botana a base de sorgo y amaranto	84
24. Caracterización física de las muestras aplicadas en el sensorial	86
25. Resultados de la prueba sensorial llevado a cabo a las distintas muestras de churritos	89
26. Resultados sobre la intención de compra hacia las distintas muestras de churritos en una escala de 5	91
27. Rendimiento en la elaboración del producto	93
28. Caracterización física de la botana elaborada, una botana comercial y la materia prima extruida y horneada	94
29. Resultados de los análisis proximales del amaranto, sorgo, amaranto extruido, sorgo extruido, churro y churro comercial	96
30. Fenoles totales libres y ligados en la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado	107
31. Contenido de flavonoides de la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado	112
32. Contenido de taninos de la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado	114
33. Capacidad antioxidante ABTS de la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado	116
34. Capacidad antioxidante DPPH de la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado	118
35. Resultados de almidón resistente	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Proyección de la prevalencia de obesidad al 2030 en diferentes países	1
2. Principales causas de muerte en México	2
3. Ventas y producción de botanas en México 2012- 2017	8
4. Clasificación y componentes de la fibra dietética	11
5. Índice glucémico bajo y alto.	16
6. Estructura del grano de sorgo	20
7. Producción mundial de sorgo 2006-2016 en millones de toneladas	21
8. Principales países consumidores de sorgo en millones de toneladas	21
9. Producción de sorgo grano en México, 2005-2015 en millones de toneladas por año agrícola	22
10. Principales estados productores de sorgo grano en México 2007-2015 en millones de toneladas	23
11. Consumo de sorgo en México por tipo, 2014-2017 en millones de toneladas	24
12. Cuerpos de proteína de sorgo en relación con el almidón y la matriz de gluteli	33
13. Esquema del cuerpo de proteína del sorgo	34
14. Semillas de amaranto cortadas A) Longitudinalmente B) Secciones	36
15. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo	43
16. Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas	44
17. Estrategia general de experimentación	48
18. Nixtamalización y determinación del porcentaje de sólidos en el sorgo	50
19. Obtención de la harina de sorgo A) Deshidratado de los granos de sorgo B) Molienda de los granos e un molino de martillos	51
20. Prueba sensorial llevada a cabo en CAIDEP-UAQ	54
21. Extracción de lípidos por medio del equipo Goldfish	56
22. Determinación de proteína bruta por el método de Kjeldhal	57
23. Determinación de humedad de las muestras	58
24. Determinación del porcentaje de cenizas en las muestras	59
25. Filtración para la determinación de fibra	60



26. Medición de textura a través del analizador de textura	61
27. Colorímetro Konica Minolta CR-400	62
28. Rotaevaporación de los extractos para obtención de fenoles ligados	63
29. Microplaca de la curva de calibración de fenoles totales y muestras	64
30. Microplaca de la curva de calibración de flavonoides y muestras	64
31. Microplaca de la curva de calibración de taninos condensados y muestras	65
32. Microplaca de la curva de calibración de DPPH y muestras	66
33. Microplaca de la curva de calibración de ABTS y muestras	67
34. Microplaca de almidón resistente	68
35. Efecto de la interacción del emulsificante y tiempo de horneado sobre la dureza de la botana	74
36. Expansión del extruido en el dado del extrusión, formación y crecimiento de las burbujas y estabilización	76
37. Interacción del porcentaje de sorgo y temperatura del extrusor	77
38. Masa extruida a una temperatura de 110-120°C	77
39. Gráfica de interacción del porcentaje de agua, tiempo de horneado y molienda del amaranto	79
40. Efecto de la proporción de agua, chile espolvoreado, molienda del amaranto y temperatura de horneado sobre la dureza del producto	81
41. Efecto del porcentaje de agua, adición de chile espolvoreado empleado en la formulación y el tiempo de horneado en la dureza del producto, utilizando: A) amaranto sin molienda B) amaranto molido y tamizado por malla 60.	82
42. Efecto del tiempo de horneado (min) y del porcentaje de agente leudante en la dureza de la botana	84
43. Espacio de color CIE L*A*B	85
44. Muestras evaluadas de churritos en el análisis sensorial	88
45. Gráfico de los resultados de los atributos evaluados para la prueba sensoria	90
46. Muestras a analizar	93
47. Muestras analizadas físicamente: A) Sorgo extruido, B) Amaranto extruido C) churro elaborado D) Churro comercial	94
48. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua	97

49. Proceso de elaboración del churro comercial	101
50. Proceso de elaboración del churro desarrollado	102
51. Porcentaje de inhibición de las muestras analizadas (ABTS)	117
52. Porcentaje de inhibición de las muestras analizadas (DPPH)	120
53. Modelo sobre la degradación de almidón producida durante la extrusión	122
B1. Curva de calibración fenoles totales	152
B2. Curva de calibración taninos condensados	152
B3. Curva de calibración flavonoides	153
B4. Curva de calibración capacidad antioxidante ABTS	153
B5. Curva de calibración capacidad antioxidante DPPH	154

Dirección General de Bibliotecas UAG

## RESUMEN

El ritmo acelerado de vida ha provocado un cambio en la frecuencia y tipo de alimentación en las personas, lo que ha promovido que las botanas hayan pasado de ser un aperitivo a una de las comidas principales, aun cuando no se consideren nutritivas. México es el segundo país en prevalencia de obesidad, estado que propicia el desarrollo de enfermedades crónicas como las del corazón y diabetes mellitus, las cuales se han clasificado como las principales causas de muerte en nuestro país. Es por todo lo anterior, que se hace necesario el desarrollo de nuevos productos, a través del uso de tecnologías emergentes, que representen opciones más saludables y sensorialmente atractivas para el consumidor. El sorgo y el amaranto son dos cereales caracterizados por su alto contenido de proteína y compuestos nutraceuticos como fibra dietética. Dado el potencial nutraceutico de estos materiales, en el presente trabajo se desarrolló una botana extrudida a base de sorgo y amaranto y se evaluó el efecto de la extrusión sobre el contenido nutricional y fitoquímico tanto de la botana como de la materia prima empleada. El emplear amaranto permitió mejorar la calidad proteica de la botana gracias a su alto contenido de aminoácidos esenciales, además de enriquecerla debido a su gran cantidad de calcio.

Para lograr este objetivo, se utilizó sorgo blanco nixtamalizado con el fin de reducir factores antinutricios y aumentar la biodisponibilidad de proteínas, minerales y aminoácidos. Para ello, se realizó la caracterización fisico-química del sorgo y amaranto, posteriormente mediante un diseño factorial 2X5, en donde la variable respuesta fue la textura, se elaboraron diferentes formulaciones de la botana extrudida. La mejor formulación se evaluó sensorialmente para conocer la aceptación de los consumidores y se realizaron análisis bromatológicos, contenido de fibra dietética, compuestos fenólicos y almidón resistente del producto.

Se apreció que al emplear el agente leudante la dureza aumentó, pero se mejoró la crujencia, por otro lado, el tiempo de horneado deteriora las propiedades sensoriales de la botana al superar los 20 minutos. Además, es importante mencionar que el porcentaje de almidón resistente es mayor que el del churro comercial.

Finalmente, se logró desarrollar una botana de segunda generación la cual presentó un contenido de almidón resistente de casi el doble en comparación con el churro comercial. además de presentar un mayor contenido de fibra y proteína con respecto la botana comercial a base de maíz y trigo, sin mencionar que la botana elaborada presentó 10 veces menos contenido de grasa que la comercial.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Problemas de salud y mortalidad en México

El sobrepeso y la obesidad se han vuelto un problema de salud pública en el mundo, cada año mueren en el mundo aproximadamente 2.8 millones de personas debido al sobrepeso o la obesidad (ENSOD, 2013). México es actualmente el país con el mayor número de personas obesas, después de Estados Unidos. Si se sigue con este ritmo de vida, se calcula que para el año 2030 el 40% de los adultos mexicanos sufrirán obesidad como se observa en la Figura 1 (OCDE, 2017).

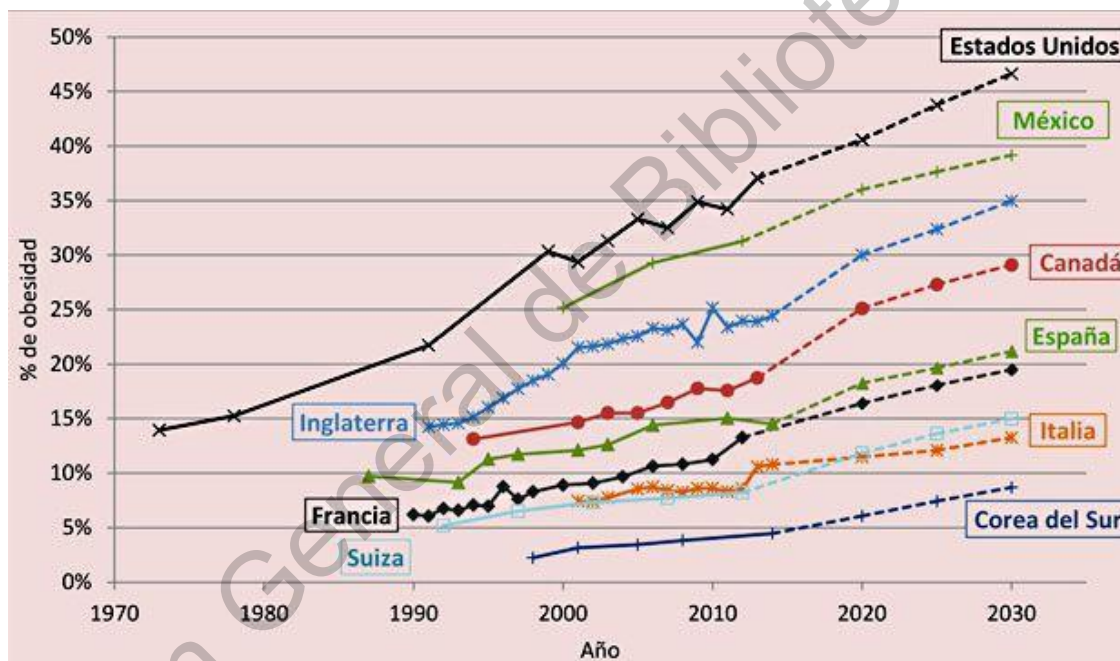


Figura 1. Proyección de la prevalencia de obesidad al 2030 en diferentes países (OCDE, 2017)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define al sobrepeso y la obesidad como una acumulación anormal o excesiva de grasa. El indicador más común que se utiliza para identificar el exceso de peso es el índice de masa corporal (IMC), el cual clasifica como sobrepeso cuando se obtiene un valor igual o superior a 25 y considera obesidad cuando éste es igual o superior a un valor de 30 (OMS, 2011).

El sobrepeso y la obesidad son factores de riesgo de múltiples enfermedades crónicas, entre las que destaca la diabetes, enfermedades cardiovasculares y el cáncer (OCDE, 2011). Según consideraciones de la OMS, el 44% de los casos de diabetes mellitus tipo 2 a estos factores antes mencionados. Además, también relacionadas a esta problemática se encuentran la hipertensión arterial, las dislipidemias, la enfermedad coronaria, la enfermedad vascular cerebral, la osteoartritis y los cánceres de mama, esófago, colon, endometrio y riñón (OMS, 2011).

De acuerdo a lo reportado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) las principales causas de muerte en México en 2017 fueron las enfermedades del corazón y diabetes mellitus con un 35% de las muertes totales (Figura 2).

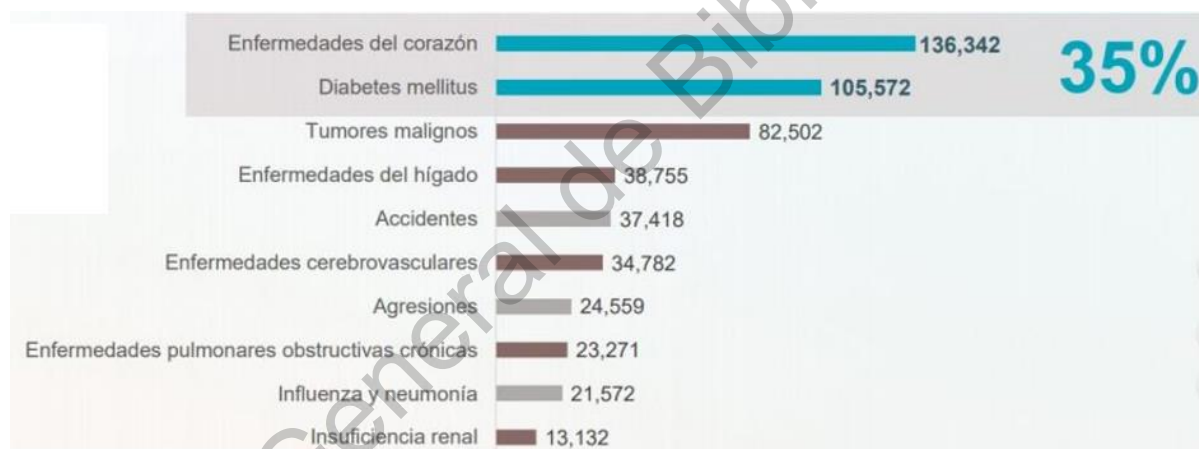


Figura 2. Principales causas de muerte en México (INEGI 2017)

Es importante mencionar, que según la Organización Mundial de la Salud estos problemas podrían haberse tratado, evitado o retrasado con dieta, actividad física, y medicación adecuada (WHO, 2014).

### 1.1.1 Dieta y balance energético

Numerosas enfermedades tienen una estrecha relación con nuestra dieta. La dieta diaria son todos aquellos alimentos que se consumen de manera habitual. Una dieta correcta debe satisfacer las necesidades de nutrientes y promover el crecimiento y desarrollo humano necesarios para la salud en cada etapa de la vida (Flores y col.,

2006). Los nutrientes son las sustancias que integran a los distintos alimentos y que son útiles para el metabolismo y corresponden a los grupos genéricamente denominados como proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas, sustancias minerales y agua. De acuerdo al *Codex Alimentarius* los nutrientes proporcionan energía y son necesarios para el crecimiento, desarrollo y mantenimiento de la vida (Soriano, 2011).

La finalidad principal del metabolismo de los macronutrientes es producir energía para mantener las funciones del organismo. La vía más común para la extracción de la energía química de un sustrato es su oxidación completa a dióxido de carbono y agua. Así pues, el destino final de todos los combustibles celulares (carbohidratos, grasas y proteínas) es su oxidación. La energía química obtenida es transportada por portadores específicos y transferida como energía útil para realizar trabajo químico (biosíntesis de macromoléculas como proteínas, glucógeno, triglicéridos) de transporte (osmótico) y mecánico (contracción muscular). El calor generado por las combustiones biológicas se utiliza para mantener la temperatura corporal (Hernández y Sastre, 1999).

La energía química liberada por oxidación, se pierde en parte como calor y en parte almacenada en forma de ATP que sirve como molécula transportadora de energía entre procesos celulares (Hernández y Sastre, 1999).

El concepto de balance energético es muy simple: Balance energético = ingreso energético- gasto energético (Hernández y Sastre, 1999).

Los factores de la ecuación del balance energético son la ingestión y el gasto de nutrimentos y energía. El primero corresponde a la alimentación y el segundo al ejercicio físico, al crecimiento corporal en las personas y a la energía basal. Cuando la alimentación no satisface las necesidades del individuo por insuficiencia o problemas de absorción o cuando el gasto aumenta (como ocurre durante las infecciones), aparecen formas de desnutrición energético-proteínica. Por el contrario, cuando la ingestión de energía y otros nutrimentos rebasa la necesidad de las

personas o se reduce el gasto por inactividad física, se manifiestan el sobrepeso y la obesidad (Flores y col., 2006).

La actual epidemia de sobrepeso y obesidad y todas sus comorbilidades que desde la niñez padece la población de nuestro país, pone de manifiesto que uno o ambos de los factores de la ecuación del balance energético no se está llevando correctamente (Flores y col., 2006). Esta alteración del balance energético se debe a la hiperfagia en la mayor parte de los casos, aunque también puede tratarse como una alteración innata (Soriano, 2011).

#### 1.1.2 Factores socioculturales de la dieta y consumo de botanas

En la dieta participan numerosos factores, como los socioculturales donde la adquisición de los alimentos depende en gran medida de su disponibilidad a lo largo del año, del grado de industrialización y comercialización de los mismos, del conocimiento de sus beneficios sobre la salud, así como del poder adquisitivo de las personas. Sin mencionar que el ritmo de vida actual ha ocasionado un cambio en el tipo y frecuencia de consumo con el fin de satisfacer necesidades (Flores y col., 2006).

Una botana es difícil de definir, pero por lo general se considera como una porción de comida, más pequeña que una comida regular, que generalmente se consume entre las comidas principales (Industria Alimenticia, 2009). Sin embargo, esta definición ya ha quedado un poco obsoleta ya que las botanas en México cubren las necesidades de los consumidores, en cuanto a: accesibilidad, precio, buen sabor además de que ofrecen una amplia variedad de presentaciones, sabores y porciones, no es exclusivo de una sola clase social y está enfocada a todas las edades (Industria Alimenticia, 2009) provocando que los consumidores las coman en cualquier momento y situación y no sólo entre comidas (Cuj-Laines y col., 2018).

##### 1.1.2.1 Botanas y su clasificación

De acuerdo con la NOM-187-SSAI/SCFI-2002, las botanas son los productos de pasta de harinas, cereales, leguminosas, tubérculos o féculas; así como de granos, frutas, frutos, semillas o leguminosas con o sin cáscara o cutícula, tubérculos;

productos nixtamalizados y piel de cerdo, que pueden estar fritos, horneados, explotados, cubiertos, extruidos o tostados; adicionados o no con sal y otros ingredientes opcionales y aditivos para alimentos

Las botanas han sido clasificadas de varias maneras a través del tiempo, por lo que no hay una clasificación formal para ellas. Una de éstas es por el proceso de manufactura que emplean como se observa en el Cuadro 1 (Cuj-Laines y col., 2018)

Cuadro 1. Clasificación de botanas en base a su proceso de elaboración

Proceso	Botana
Freído	Papas, zanahoria, chicharrones de cerdo entre otras frituras.
Extrusión	Compuestos extruidos, pellets, maíz extruido
Cubiertos	Cacahuates y palomitas cubiertas
Explotado	Palomitas de maíz
Tostado	Semillas (girasol, calabaza), cacahuates
Horneado	Pretezel, muffins, galletas

(Cuj-Laines y col., 2018)

Es importante resaltar que actualmente el proceso de extrusión representa una de las tecnologías con mayor impacto en la industria alimentaria debido a la gran variedad de productos que se pueden obtener y los beneficios nutricionales que representa, por ejemplo, se utiliza en la producción de hojuelas de maíz, arroz inflado, cereales para el desayuno, proteínas texturizadas, bebidas instantáneas, análogos de carne, alimentos para mascotas y bocadillos (Navarro-Cortez et al., 2016).

Por otro lado, las botanas también se pueden clasificar con base en sus características fisicoquímicas en tres grupos:

Botanas de primera generación: En esta categoría se sitúan todos los productos naturales utilizados para botana, como nueces, papas fritas y palomitas (Wrigley y col., 2016)



Botanas directamente expandidas: La mayoría de las botanas elaboradas por extrusión caen en esta categoría. Por lo general éstas están hechas a base de harina de maíz, son normalmente cortas en longitud (menos de 10:1 L/D) y su contenido de humedad oscila entre 8 y 10% en base húmeda. Además, requieren un secado adicional para lograr la crujencia deseada, reduciéndose la humedad entre 1 y 2 % - Se ha considerado que este tipo de botanas son los más sencillas de ejecutarse en el extrusor (Ríaz, 2000)

Botanas de tercera generación: Las botanas o snacks de tercera generación están comenzando a ser cada vez más populares entre los productores y consumidores. Éstos también son conocidos como productos intermediarios, pellets o comprimidos. Estos productos tienen una gran estabilidad al almacenamiento y una alta densidad aparente que facilita con ello su manejo. A diferencia de las botanas de segunda generación, éstas botanas después de ser cocidas y formadas por extrusión, los pellets duros y densos se secan hasta obtener un contenido de humedad estable, asegurando así su estabilidad en el almacenamiento. Cuando se secan, los pellets se expanden con aceite caliente, aire caliente o microondas. Los productos expandidos son sazonados con sal y varias especias, empacados y vendidos como alimentos listos para consumir (Ríaz, 2000).

La clasificación general de botanas se hace de acuerdo a su sabor, lo que da lugar a dos tipos de botanas: saladas y dulces. Dentro de las primeras se pueden encontrar papas fritas, semillas fritas o tostadas, palomitas y cacahuates. Las botanas dulces son básicamente las palomitas con caramelo, cereales, semillas y algunas frutas (Caldas y Rincón, 2010). Actualmente se ve una tendencia de las personas a consumir snacks salados debido al cambio en los estilos de vida y la ventaja que ofrecen estos productos en cuanto a su transporte y almacenamiento fácil después de comprarlos. En el 2016, los bocadillos salados fueron fácilmente disponibles a través de una amplia gama de canales de distribución y son los aperitivos más populares entre los consumidores (Euromonitor International, 2016).

En el presente trabajo se desarrolló una botana de segunda generación similar a los churritos fritos, sin embargo, ésta tras el proceso de extrusión fue horneada.

### 1.1.3 Consumo y ventas de botanas en México

El ritmo acelerado de vida, que actualmente se lleva, ha ocasionado que muchas veces que las botanas se conviertan en la comida principal (Cuj-Laines y col., 2018) aun cuando éstas no se consideren benéficas a la salud debido al desbalance nutrimental en su contenido de grasas, carbohidratos, proteínas, vitaminas, minerales y fibra o bien, debido al azúcar, grasa y complementos añadidos que podrían afectar la salud del consumidor (Sobota y col., 2010).

Para contribuir al control de la epidemia de sobrepeso y obesidad en México, se implementó, a partir de enero de 2014, una estrategia integral que incluye un impuesto a bebidas azucaradas y a un grupo de alimentos con alto contenido calórico (ENSOD, 2013). Este impuesto especial sobre producción y servicios (IEPS) aplicó para las bebidas azucaradas (un peso por litro) y a los alimentos de alto contenido calórico (8% a alimentos con más de 275 kilocalorías por cada 100 gramos) entre los que se encuentran las botanas como; papas fritas, frituras de maíz, cacahuates, chicharrón de cerdo, palomitas y frituras de harina de trigo, que en promedio contienen 528 calorías por 100 gramos (132 calorías por porción estándar de 25 gramos) (Aguilera y col., 2017).

A pesar de esto, la industria que produce botanas a partir de cereales va en crecimiento y cada vez va adquiriendo mayor importancia, año con año existe un aumento en la producción y consumo de botanas (Euromonitor, 2016). El mercado mexicano de botanas o snacks tiene un valor de 3,000 millones de dólares anuales, siendo el mayor respecto a los mercados de países como Brasil, China, India o Sudáfrica. Sabritas de Pepsico y Barcel de Grupo Bimbo, cuenta una participación en el mercado del 70 y 20%, respectivamente (Caldas y Rincón, 2010). Del 2012 al 2017, las ventas en millones de pesos han aumentado de cerca de 46 mil millones de pesos a casi 70 mil millones de pesos mexicanos (Figura 3) (Euromonitor, 2016).

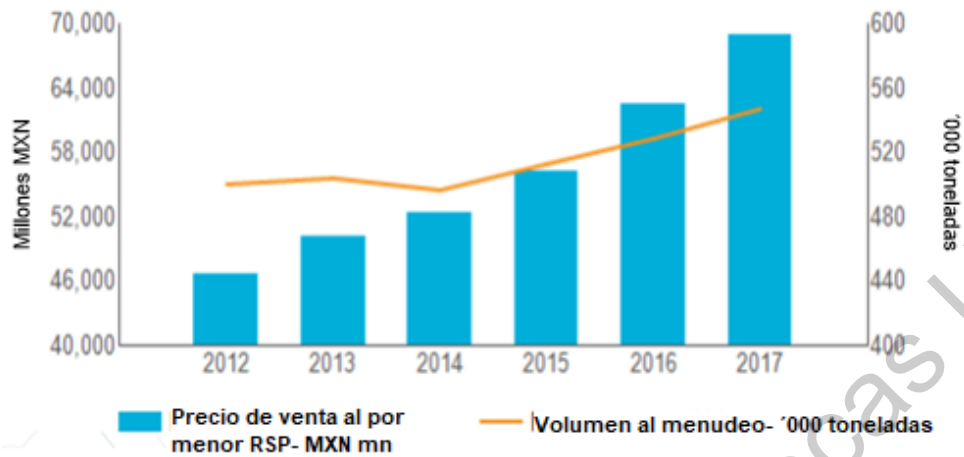


Figura 3. Ventas y producción de botanas en México 2012- 2017 (Euromonitor, 2016)

Sin embargo, el desarrollo de nuevos productos se debería establecer para impulsar el crecimiento económico a medida que los productores presenten opciones más saludables y sabrosas (Euromonitor,2016).

Las botanas son elaboradas principalmente a base de maíz, trigo y arroz ya que, en términos de producción, estos cereales se encuentran por encima de los demás contribuyendo a más del 25% de la producción mundial de cereales (Gil, 2010). Cabe resaltar que, en varios países, aunque el sorgo sólo se ha utilizado principalmente para consumo pecuario, recientemente existe un considerable interés en su uso para la alimentación humana, debido a su contenido fitoquímico, su potencial nutricional y la posibilidad de ser usado en productos libres de gluten (Vieira, 2015)

#### 1.1.4 Tendencia de las industrias de las botanas

La nueva tendencia de las industrias es proporcionar a los consumidores suministros nutricionales de buena calidad, en donde del 10% al 12% de las calorías totales provengan de las proteínas y que contengan ingredientes funcionales (Cuj-Laines y col., 2018)

Estos alimentos funcionales aparte de sus funciones nutricionales básicas, proporcionan beneficios fisiológicos y / o reducen el riesgo de algunas enfermedades

crónicas. Los alimentos funcionales contienen (o agregan) un componente con un efecto positivo a la salud o eliminan algún componente con efecto negativo (Fuentes-Zaragoza y col., 2010).

Un ejemplo de esto es el almidón resistente, el cual se ha usado ampliamente como ingrediente funcional, especialmente en alimentos que contienen altos niveles de fibra dietética (Fuentes-Zaragoza y col., 2010).

Los granos de sorgo no solo son una buena fuente de nutrientes, sino que también contienen componentes especiales, como los fitoquímicos y la fibra dietética, así como almidón resistente, que es esencial para mantener el buen estado de la salud de las personas (Ratnavathi y col., 2016). Además, debido a la ausencia de gluten, el sorgo tiene potencial para la elaboración de alimentos para personas celiacas (Vieira, 2015).

#### 1.1.4.1 Fibra dietética

En 2001 The American Association of Cereal Chemists (AACC) definió a la fibra dietética (FD) como "remanente de la parte comestible de las plantas y los carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano con fermentación completa o parcial en el intestino grueso". La fibra incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias vegetales asociadas. La fibra provoca un aumento de volumen y ablandamiento fecal así como aumento de la frecuencia y / o regularidad de laxación, atenuación del colesterol en la sangre y / o disminución de la glucosa en la sangre (ACC Report, 2001).

Para armonizar el concepto de FD, en 2009, CODEX publicó su definición de FD que incluye polímeros de carbohidratos con 10 o más unidades monoméricas que no se hidrolizan por las enzimas endógenas en el intestino delgado de los humanos (Stephen y col., 2017) y pertenecen a las siguientes categorías:

- Polímeros de carbohidratos comestibles que se encuentran naturalmente en los alimentos cuando se consumen.

- Polímeros de carbohidratos, que se han obtenido de la materia prima por medios físicos, enzimáticos o químicos y que han demostrado tener un efecto fisiológico de beneficio para la salud como lo demuestran las pruebas científicas generalmente aceptadas ante las autoridades competentes (Stephen y col., 2017).
- Polímeros sintéticos de carbohidratos, que han demostrado tener un efecto fisiológico que beneficia la salud, como lo demuestran las pruebas científicas generalmente aceptadas ante las autoridades competentes (Stephen y col., 2017).

De acuerdo a la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), la fibra dietética se define como aquellos carbohidratos no digeribles, más lignina, incluidos los polisacáridos que no contienen almidón (PSA), oligosacáridos resistentes, almidón resistente y lignina asociada con los polisacáridos de la fibra dietética. Entre los PSA, se encuentran celulosa, hemicelulosas, pectinas, hidrocoloides (gomas, mucílagos, glucanos). Los oligosacáridos resistentes incluyen fructo-oligosacáridos (FOS) y galacto-oligosacáridos (GOS), entre otros. El almidón resistente consiste en almidón encerrado físicamente, algunos tipos de gránulos de almidón en bruto, amilosa retrogradada, almidones modificados químicamente y / o físicamente (EFSA, 2010).

La fibra dietética se puede clasificar en dos grandes grupos según su solubilidad (Figura 4): fibra dietética insoluble (FDI) y fibra dietética soluble (FDS). La FDI consiste principalmente en componentes de la pared celular, que incluyen celulosa, algunas hemicelulosas, lignina y almidón resistente, mientras que la FDS consiste en polisacáridos no celulósicos como oligosacáridos, arabinosilanos,  $\beta$ -glucanos, algunas hemicelulosas, pectinas, gomaz, mucílagos e inulina.

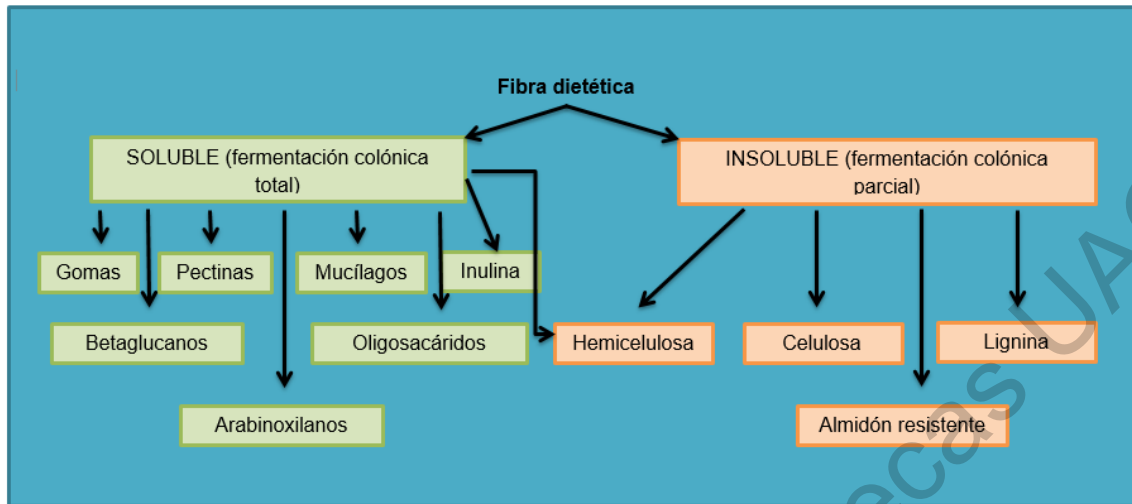


Figura 4. Clasificación y componentes de la fibra dietética (Ciudad-Mulero y col., 2019)

La FDI puede contribuir al funcionamiento normal del tracto intestinal. Su consumo está relacionado con un aumento del peso de las heces y una disminución del tiempo de tránsito del colon. Tiene un papel importante en la prevención de la diverticulosis colónica y el estreñimiento. La fibra dietética insoluble (FDI) tiene potencial antioxidante proveniente de los compuestos fenólicos lo que genera ciertos beneficios para la salud (Ciudad-Mulero y col., 2019).

La FDS es hidrófila, cristalina y se humedece fácilmente con el fluido gastrointestinal acuoso, formando dispersiones coloidales viscosas o geles cuando se hidrata. Es fermentada por la microflora intestinal y está asociada con el metabolismo de los carbohidratos y los lípidos, mostrando propiedades hipocolesterolémicas (Ciudad-Mulero y col., 2019). La fibra soluble también retarda la digestión y la velocidad en la que los carbohidratos y otros nutrientes se absorben en el torrente sanguíneo. Esto puede ayudar a controlar el nivel de glucosa en la sangre (a menudo denominado azúcar en la sangre) después de ingerir una comida (FDA, 2019). Además, gracias a sus propiedades fisicoquímicas, ésta es utilizada en la industria para modificar la textura e influir en las propiedades coligativas de los sistemas alimentarios, mejorando así la capacidad de comercialización del producto como alimento benéfico para la salud (alimento funcional) (Ciudad-Mulero y col., 2019). De acuerdo a lo

establecido por la FDA, un alimento se considera “buena fuente de fibra” si contiene 2.5 g a 4.9 g de fibra por porción y uno “alto en fibra” contiene 5 g de fibra o más por porción. La Organización Mundial de la Salud (OMS), recomienda una ingesta de 25 gramos de fibra dietética al día. Esto basado en una dieta de 2000 kilocalorías (SSA, 2016). En México, la Ingesta Diaria Recomendada (IDR) es de 30 g (NOM-051-SCFI/SSA1-2010)

#### 1.1.4.1 Almidón resistente

En el cuerpo humano, el almidón es digerido por  $\alpha$ -amilasas a lo largo del tracto gastrointestinal. Primero, en la boca, la  $\alpha$ -amilasa salival cataliza la hidrólisis de amilosa y amilopectina. Posteriormente, el almidón parcialmente digerido pasa al estómago. Después de cierto tiempo de residencia en el pH bajo del estómago, el almidón parcialmente hidrolizado pasa al intestino delgado donde se neutraliza. La mayor hidrólisis de almidón lo lleva a cabo la  $\alpha$ -amilasa pancreática. Las  $\alpha$ -amilasas hidrolizan el almidón en pequeños mono-, di- y oligosacáridos que posteriormente se descomponen en monosacáridos con ayuda de otras enzimas, para ser convertidos a glucosa, la cual se absorbe en el intestino delgado. Varios factores influyen en la velocidad y la eficiencia de la digestión del almidón. La digestión del almidón por  $\alpha$ -amilasas requiere una serie de pasos. Primero, las enzimas se difunden en la matriz del almidón del alimento. Posteriormente, éstas se unen al sustrato y finalmente rompen los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 del sustrato (almidón). La estructura de la matriz de alimentos y la estructura del almidón influyen en la cinética de su hidrólisis (Wrigley y col., 2016)

La D-glucosa resultante se transporta de manera activa a través de la membrana luminal del intestino delgado y pasa a la sangre por medio de un co-transportador de sodio-glucosa, que está ubicado en la superficie luminal de enterocitos. Sin embargo, existe una fracción que es resistente a las enzimas digestivas y por lo tanto no se absorbe, a esta fracción se le denomina almidón resistente (Wrigley y col., 2016). El almidón resistente se define como la suma del almidón y de sus productos de degradación (monosacáridos, disacáridos y oligosacáridos) que no son absorbidos en el intestino delgado de los individuos sanos (Hernández y Sastre, 1999). El

almidón resistente pasa prácticamente intacto al colon en donde se fermenta por la acción de microbiota local. Se ha estimado que hasta el 20% del almidón de la dieta se escapa de la digestión en el intestino delgado, ya sea por factores intrínsecos o extrínsecos al propio almidón (Hernández y Sastre, 1999); esto depende también de la forma de procesamiento que se aplique al alimento. La fabricación de almidón resistente generalmente involucra hidrólisis ácida parcial y tratamientos hidrotermales, calentamiento, retrogradación, cocción por extrusión, modificación química y polimerización (Fuentes-Zaragoza y col., 2010). El almidón resistente se ha clasificado en cinco tipos, los cuales se describen en el Cuadro 2 (Wrigley Y col., 2016).

El almidón resistente tipo 1, es un almidón físicamente inaccesible, es decir, estos gránulos de almidón se encuentran físicamente envueltos dentro de una matriz de tal modo que las enzimas digestivas no pueden tener acceso a él (Fuentes-Zaragoza y col., 2010). Este tipo de almidón se presenta en granos enteros o parcialmente molidos, semillas, cereales o legumbres. Este tipo de almidón resulta afectado por la elaboración de los alimentos y puede disminuir o ser eliminado por la molienda (Estudio FAO, 1999).

El almidón resistente tipo 2 se refiere a algunos tipos de gránulos de almidón en bruto y los almidones con alto contenido de amilosa (Fuentes-Zaragoza y col., 2010). La resistencia del almidón tipo 2, probablemente se debe a la naturaleza cristalina del almidón (es decir, las regiones cristalinas del gránulo de almidón son menos susceptibles al ataque por ácido y enzimas en las regiones amorfas) (Estudio FAO, 1999)

El almidón resistente tipo 3 se refiere al almidón retrogradado, ya sea por el procesado a partir de un almidón no modificado o como resultado de aplicaciones de procesamiento de alimentos. La resistencia al ataque de la enzima se debe a la estructura física de las cadenas de almidón que han tenido un reordenamiento a causa de retrogradación o debido a un tratamiento térmico (Fuentes-Zaragoza y col., 2010). Diferentes factores, como la relación amilosa / amilopectina, la longitud de la



cadena, el contenido de lípidos y las condiciones de procesamiento, han demostrado que influyen en la cantidad y calidad del almidón resistente tipo 3 (Wrigley y col., 2016).

La resistencia en el almidón tipo 4 es debido a una modificación química del almidón, mientras que la resistencia hacia las enzimas (Fuentes-Zaragoza y col., 2010). Por otro lado, el almidón tipo 5 se debe a la estructura de los complejos de amilosa-lípidos que pueden estar presentes ya sea en el almidón nativo o debido a su formación por reacciones controladas utilizando almidón no granular y lípidos, en la que se forma un complejo resistente de amilosa-lípido (Fuentes-Zaragoza y col., 2010).

Cuadro 2. Clasificación del almidón resistente

<b>Tipo de almidón resistente</b>	<b>Fuente de resistencia</b>	<b>Ejemplos</b>
1	Granos enteros	Semillas, granos
2	Estructura del gránulo de almidón crudo	Papa, alta amilosa, banana verde
3	Estructuras formadas por la reasociación o retrogradación del almidón después del tratamiento térmico	Pasta cocida, papa cocida
4	Modificación química del almidón	Almidón modificado
5	Complejo almidón-lípido	Almidón que contiene cierta cantidad de amilosa y forma complejos con lípidos

(Wrigley y col., 2016)

El almidón resistente (AR) se puede utilizar para mejorar el contenido de fibra de los alimentos y se está investigando su potencial para acelerar el inicio de la saciedad y para reducir la respuesta glucémica (Fuentes-Zaragoza y col., 2010). De acuerdo a ciertos estudios, se ha comprobado que la harina de sorgo muestra significativamente un mayor contenido de almidón resistente comparado con el trigo, reduciendo la respuesta glucémica en humanos sanos (Poquette y col., 2014).

#### 1.1.4.2 Índice glucémico

El término índice glucémico (IG) fue propuesto por Jenkins en 1981 y éste es un indicador del incremento en la glucemia que se produce después de ingerir un alimento, en comparación con el aumento producido por la ingestión de la glucosa (Casanueva y col., 2008).

El IG proporciona información sobre la respuesta glicémica que puede esperarse cuando una persona consume un alimento que contiene una cantidad fija de carbohidratos (generalmente 50 g). La respuesta se expresa como el área incremental bajo la curva de glucosa en la sangre durante un período de dos horas (Vega-López y col., 2018). En otras palabras, el índice glucémico nos indica numéricamente si los carbohidratos llegan lenta, moderada o rápidamente al torrente sanguíneo (Torres-Torres y col., 2006).

Los alimentos amiláceos con un bajo índice glucémico son digeridos y absorbidos más lentamente que los alimentos con un IG alto. Algunos de los factores que influyen en las respuestas glicémicas son:

- Cantidad de carbohidratos
- Naturaleza de los componentes monosacáridos (Glucosa, Fructuosa, Galactosa)
- Naturaleza del almidón (Amilosa, amilopectina, interacción entre almidón y nutriente, almidón resistente)
- Cocción/ elaboración de los alimentos (Grado de gelatinización del almidón, tamaño de partícula, forma del alimento, estructura celular)
- Otros componentes alimenticios (Grasa y proteína, fibra de la dieta, antinutrientes, ácidos orgánicos) (Estudio FAO, 1999).

Si el IG es de 70 o mayor se considera que el alimento tiene un IG alto, si se encuentra entre 56 y 69 es moderado y si el valor es de 55 o menos se dice que es bajo (Figura 5). Para establecer estos valores se ha tomado como referencia la curva de glicemia de la glucosa, a la cual se le asigna un valor de IG de 100 (Torres-Torres y col., 2006).

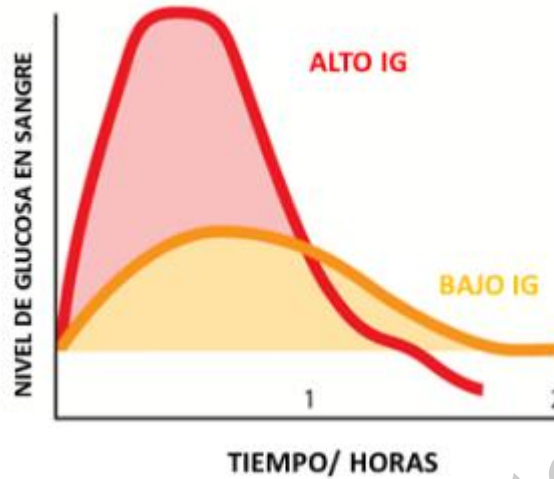


Figura 5. Índice glucémico bajo y alto. (University of Sydney, 2017)

Los alimentos con mayor índice glucémico son aquellos que contienen carbohidratos: a) con partículas pequeñas; b) contienen más amilosa que amilopectina; c) se absorben lentamente; d) han sufrido procesos térmicos o mecánicos que facilitan la gelatinización o disminuyen el tamaño de las partículas, y e) no contienen cantidades apreciables de fibra, lípidos o proteínas (Casanueva y col., 2008)

La carga glicémica (CG) es un concepto matemático derivado del índice glicémico y de la cantidad de carbohidratos. Se creó para para representar el efecto glicémico global de una dieta donde se toma en cuenta el tamaño habitual de la ración. Un incremento en la carga glicémica se asocia con valores altos de glucosa e insulina. Por lo tanto, es de interés evaluar los conceptos de índice glucémico y carga glicémica al mismo tiempo. Se sabe que los alimentos con  $CG < 10$  son considerados con una CG baja, y aquellos alimentos con una  $CG \geq 20$  son considerados con una CG alta (Torres-Torres y col., 2006).

Las dietas con IG pueden mejorar el control glucémico, lo que lleva a una menor producción de insulina y respuestas inflamatorias, así como a disminuir el riesgo de varias enfermedades crónicas, incluido el cáncer (Hu y col., 2013). Por el contrario, Las dietas con índice glicémico alto puede promover la intolerancia a la glucosa, la resistencia a la insulina y la hiperinsulinemia (Jekins y col., 2000)

La regulación de la saciedad es un mecanismo complejo que depende de múltiples factores, entre ellos las hormonas relacionadas con la saciedad, como la insulina, la leptina, la grelina, la colecistoquinina (CCK), el péptido 1 similar al glucagón (GLP-1), el péptido tirosina-tirosina (PYY), enterostatina, amilina y oxintomodulina (Choudhury y col., 2016; Strader y Woods., 2005). Por lo tanto, no existe un biomarcador que pueda servir como una medida única de saciedad. Aunque hay un interés creciente en cómo los diferentes componentes de la dieta afectan el apetito o la saciedad, los efectos específicos de la carga glicémica no se han estudiado a fondo, y con algunas excepciones, se han evaluado utilizando medidas subjetivas que consisten en escalas analógicas visuales en donde el evaluador califica su grado de saciedad en una escala numérica (Vega-López y col., 2018).

Algunos de los productos elaborados a base de sorgo, contienen un índice y una carga glucémica menor que otros elaborados a base de trigo y arroz (Prasad y col., 2014).

#### 1.1.4.3 Productos libres de gluten

Principalmente en los países desarrollados, existe hoy una enorme demanda de alimentos y bebidas sin gluten para las personas con enfermedad celíaca (Taylor y col., 2006). La enfermedad celíaca es un trastorno digestivo que afecta al intestino delgado. Las personas con esta enfermedad no pueden ingerir gluten, el cual es una proteína que se encuentra en el trigo, la cebada y el centeno. Esta enfermedad puede causar problemas digestivos a largo plazo e impedir la obtención de nutrientes necesario. En México, se calcula que del 1 al 4.3% de la población padece esta enfermedad y aún no se han dado cuenta, mientras que en países desarrollados se calcula que por cada persona con esta enfermedad 5 no se han diagnosticado (NIH,2012) mientras que la prevalencia media mundial se ha estimado en 1:266 (Taylor y col., 2006).

## 1.2 Sorgo

### 1.2.1 Generalidades

El consumo de cereales data de tiempos muy antiguos. En las civilizaciones americanas, el maíz era el cereal que más se cultivaba y de hecho hoy en día continúa siendo el alimento básico de la dieta de la mayoría de las poblaciones mesoamericanas. En Asia, el cereal predominante es el arroz mientras que, en África, los principales cereales son el sorgo y el mijo (INCAP, 2015).

El sorgo pertenece a la tribu *Andropogonae* de la familia herbácea *Poaceae*. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) forma parte de esta tribu y es pariente próximo del sorgo (FAO, 1995). En 1753, Linnaeus describió tres especies de sorgo cultivado: *Holcus sorghum*, *Holcus saccharatus* y *Holcus bicolor*. En 1974, Moench distinguió el género *Sorghum* del *Holcus*. Sin embargo, en 1805 Person propuso el nombre de *Sorghum vulgare* para el *Holcus sorghum* (L.). Por otro lado, en 1961 Clayton propuso el nombre de *Sorghum bicolor* (L.) Moench como el nombre correcto del sorgo cultivado y es el nombre que se utiliza actualmente (FAO, 1995). El sorgo (*Sorghum bicolor*) se conoce bajo varios nombres: mijo grande, maíz de Guinea en África occidental, duró en el Sudán, mtama en África oriental, iowar en la India y kaoliang en China. En los Estados Unidos se suele denominar milo o maíz milo (FAO, 1995).

Los granos de sorgo se cultivan generalmente en regiones demasiado secas y calientes comparado a las regiones en que se cultiva maíz. Este cereal es capaz de adaptarse a los climas más secos debido a varios factores: Tienen la capacidad de permanecer inactivos durante la sequía y luego reanudar el crecimiento; las hojas se enrollan reduciendo el área expuesta para la transpiración; además, éstas y los tallos contienen un abundante revestimiento ceroso que los protege del secado. Por otro lado, el sorgo presenta una proporción de transpiración baja (kg de agua necesaria para producir un kg de materia vegetal), por ejemplo, se requiere 141 kg para el sorgo, 170 kg para el maíz y 241 kg para el trigo. Cabe mencionar que el sorgo contiene un gran número de raíces fibrosas que extraen con eficiencia la humedad

del suelo (el área de absorción es aproximadamente el doble que el del maíz) y las raíces pueden tener hasta 2,5 m de longitud (Food Security Department, 1999).

El sorgo puede soportar temperaturas por encima de 38°C, sin embargo, los vientos secos junto con el clima caliente durante la polinización disminuyen los rendimientos. Los mejores rendimientos se obtienen cuando las temperaturas son de 24 - 27°C; Los requerimientos de agua para el sorgo varían en un rango de 350-700 mm dependiendo de la longitud del ciclo de crecimiento. El ciclo de crecimiento corto es de 90 días; mientras que el largo es de más de 130 días. Los sorgos pueden tolerar una amplia gama de pH y texturas del suelo (Food Security Department, 1999). Debido a lo anterior, el sorgo es considerado como uno de los cultivos de cereales más resistentes a la sequía por lo que éste podría representar un importante cultivo para consumo humano debido al continuo aumento de la población mundial y a la disminución de los suministros de agua que actualmente se presenta (Taylor y col., 2006).

Los granos de sorgo miden aproximadamente 4 mm de largo, 2 mm de ancho y 2.5 mm de grosor, su color varía de negro, rojo, púrpura, marrón, amarillo a blanco (Ratnavathi y Komala, 2016). La Figura 6 ilustra la estructura del grano del sorgo (Food Security Department, 1999). Los componentes anatómicos básicos son pericarpio (capa externa), germen (embrión) y endospermo (tejido de almacenamiento). El pericarpio tiene un espesor de 8 a 160  $\mu\text{m}$  y se divide en tres capas: epicarpio, mesocarpio y endocarpio (Ratnavathi y Komala, 2016). Inmediatamente debajo del pericarpio hay una capa conocida como la capa de semilla o testa. Al igual que el pericarpio, el grosor de la testa también varía de 8 a 40  $\mu\text{m}$  dependiendo del genotipo del sorgo. Esta capa es responsable del almacenamiento de taninos y pigmentos en algunos de los genotipos de sorgo (Ratnavathi y Komala, 2016).

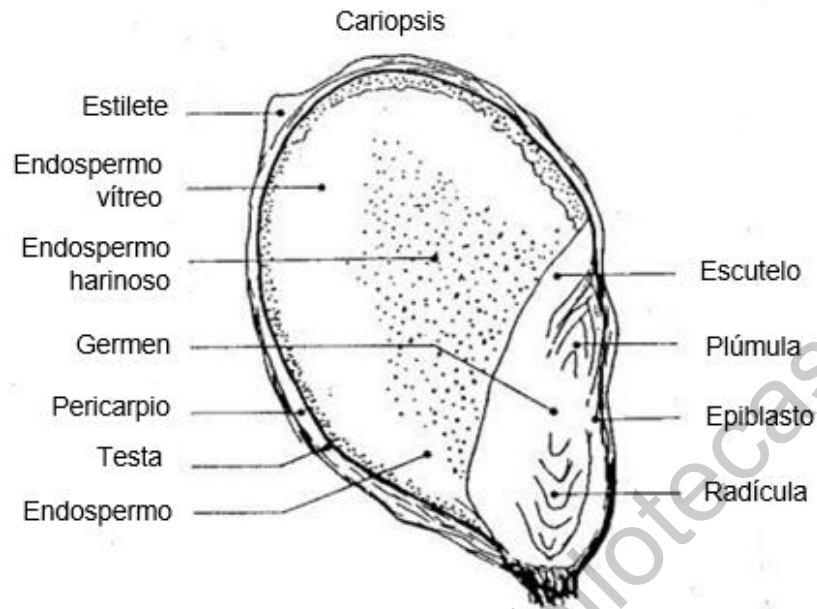


Figura 6. Estructura del grano de sorgo (Food Security Department, 1999)

El peso de mil granos se ubica entre 25-35 g. La densidad del grano oscila generalmente entre 1.26 y 1.38 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente (Kulp y Ponte, 2000).

### 1.2.2 Producción de sorgo

El sorgo se considera originario de África, pero con el paso del tiempo se ha distribuido en muchos otros países destacando principalmente Estados Unidos (Bantitlán y col., 2001). Los principales productores de sorgo en los últimos años son Estados Unidos, México, Nigeria, India, entre otros (Figura 7).

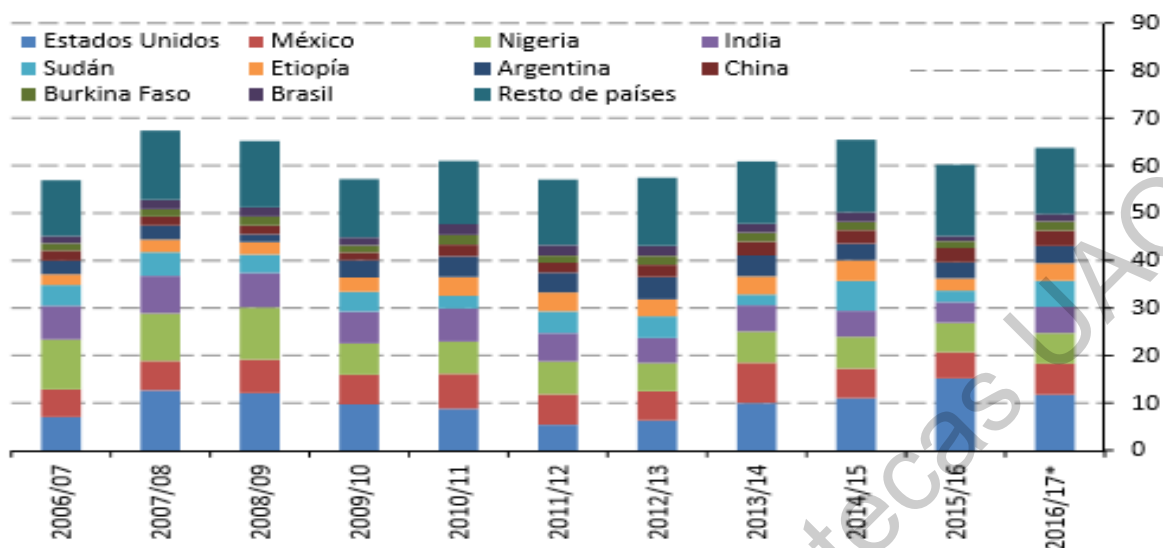


Figura 7. Producción mundial de sorgo 2006-2016 en millones de toneladas (Panorama agroalimentario, 2016)

Tal como se muestra en la Figura 8, ocho países concentran el 71.1% del consumo total mundial de sorgo: China, México, Nigeria, Sudán, India, Estados Unidos, Etiopía y Argentina (Panorama agroalimentario, 2016).

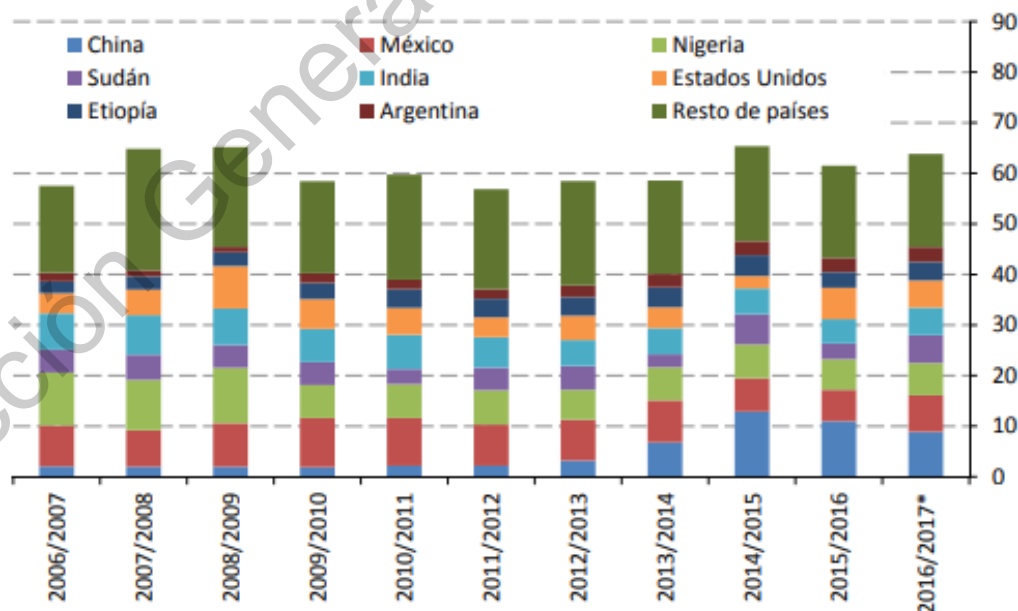


Figura 8. Principales países consumidores de sorgo en millones de toneladas (Panorama, 2016)



México actualmente es el segundo productor mundial de sorgo, después de Estados Unidos, teniendo producciones anuales de aproximadamente 7 millones de toneladas (Panorama, 2016). Sin embargo, durante el año agrícola 2015, la producción del grano de sorgo en México decreció a una tasa anual de 38.1% para finalizar en una producción 5.1 millones de toneladas, poco menos a lo producido en los años anteriores (Figura 9). Lo anterior como consecuencia de las afectaciones provocadas por el pulgón amarillo en algunas regiones productoras (Panorama agroalimentario, 2016).

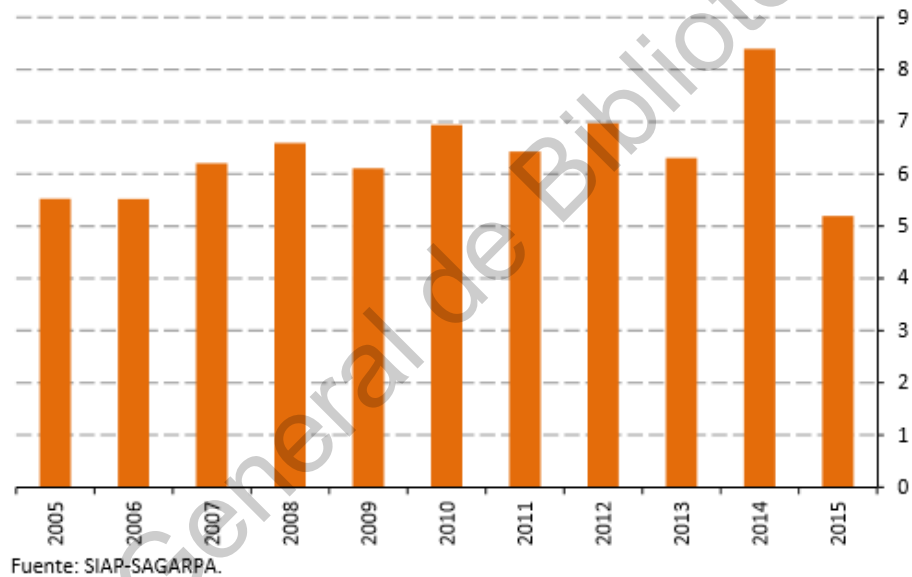


Figura 9. Producción de sorgo grano en México, 2005-2015 en millones de toneladas por año agrícola (Panorama agroalimentario, 2016)

Durante el año agrícola 2015, cinco estados concentraron aproximadamente el 82% de la producción nacional de sorgo (Figura 10). Tamaulipas se ubica como el principal productor de sorgo en el país con una participación de 40.2%, lo cual representa un volumen de 2.0 millones de toneladas. En segundo lugar, se encuentra Guanajuato con 15.9% de participación y un volumen de producción de 0.8 millones de toneladas.

El tercer lugar lo ocupa Sinaloa con una participación de 13.3% del total y un volumen de 0.7 millones de toneladas (Panorama agroalimentario, 2016).

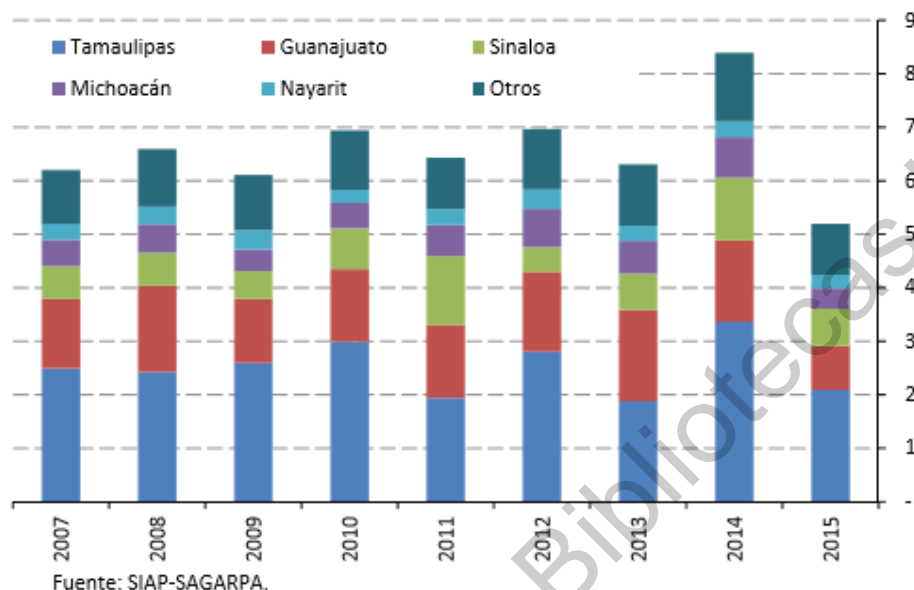


Figura 10. Principales estados productores de sorgo grano en México 2007-2015 en millones de toneladas (Panorama agroalimentario, 2016)

### 1.2.3 Uso del sorgo y productos alimenticios

El sorgo es consumido en diversas presentaciones dependiendo de la parte del mundo en que se encuentre (Rakshit y Wang, 2016). Aunque el sorgo ha sido un componente importante de la dieta de las poblaciones de las zonas en desarrollo del mundo durante siglos, ha habido menos interés en el sorgo como fuente de alimento humano en los países desarrollados, como Australia y los Estados Unidos, donde ha sido principalmente utilizado como alimento para el ganado y producción de biocombustibles (Wu y col., 2017). El sorgo también ha demostrado desempeñar un papel importante en la producción de etanol y otros productos bioindustriales, como los bioplásticos especialmente en áreas secas donde otros cultivos no son tan fáciles de cultivar (Taylor y col., 2006)

En México el 96.1% del consumo total de sorgo se emplea para consumo pecuario (Figura 11).

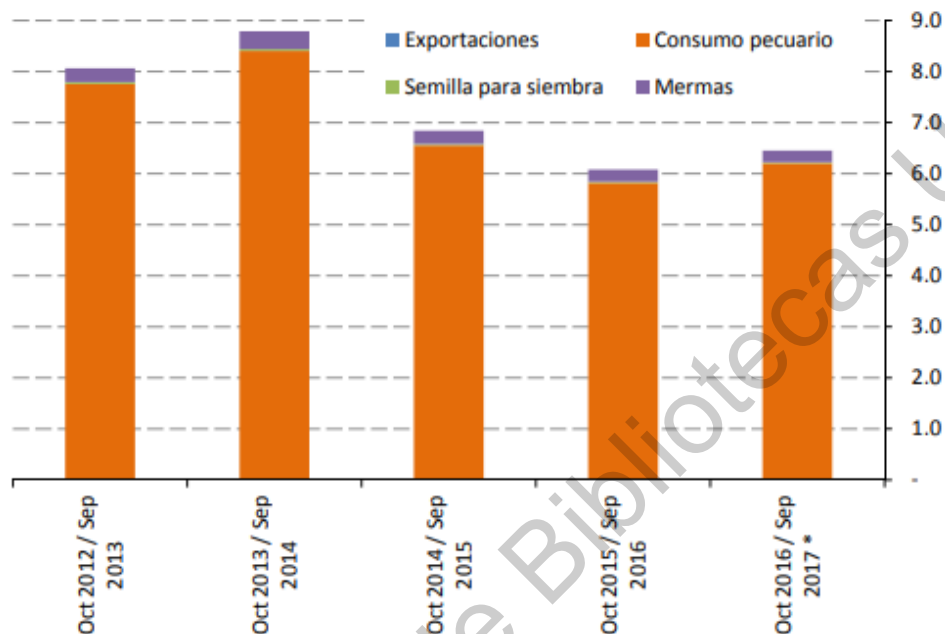


Figura 11. Consumo de sorgo en México por tipo, 2014-2017 en millones de toneladas (Panorama agroalimentario, 2016)

Generalmente el grano entero es procesado para la elaboración de harina a partir de la cual, diferentes platillos tradicionales son elaborados (Rakshit y Wang, 2016). La variedad de sorgo blanco ha permitido producir harina blanca, de sabor suave. Esta harina es útil en los productos alimenticios porque no imparte colores inusuales o sabores fuertes, razones por la cual podría ser preferida respecto a la harina de maíz (Taylor y col., 2006). Sin embargo, las variedades de sorgo con colores oscuros y con taninos podrían ser utilizados en países donde el pan oscuro a base de centeno es común (por ejemplo, Alemania o Europa del Este). En estas comunidades, por lo general el color "oscuro" se asocia con "saludable". Los colores parduscos también podrían ser aceptables en pasteles de chocolate, galletas, muffins, y/o galletas de melaza (Taylor y col., 2006).

Algunos de los principales platillos preparados a base de sorgo (Cuadro 3) son: pan sin levadura con o sin la fermentación de la masa en Asia y parte de África, gachas fermentadas o no fermentadas las cuales pueden ser finas o gruesas, productos cocidos similares a los preparados a base de granos de arroz o maíz. En India el sorgo es utilizado en la preparación de muchas comidas tradicionales y en productos de panadería tales como pan, pasteles y biscuits. El grano es principalmente consumido como pan plano sin levadura, *roti* o *bhakri* preparado a partir de este tipo de harina. En ciertas partes de la India, especialmente en el sur, el sorgo es tradicionalmente hervido después de ser descascarillado. En países del Medio Oriente el grano de sorgo es usado en la preparación de sopas, pasteles y otros productos de panadería. En China, el sorgo es el principal ingrediente en la producción de bebidas destiladas como *Maotai* y *Erguotou*. Mientras que, en otros países como África, este grano ha sido utilizado como sustituto de otros granos en la producción de cerveza libre de gluten (Rakshit y Wang, 2016).

Cuadro 3. Formas de utilización del sorgo en India

Alimento a base de sorgo	Tipo de producto	Tipo de grano empleado
<i>Roti</i>	Pan plano sin levadura	Harina
<i>Sangati</i>	Gachas consistentes	Mezcla de partículas gruesas y harina
<i>Annam</i>	Parecido al arroz	Grano descascarado
<i>Kudumulu</i>	Hervido	Harina
<i>Dosa</i>	Torta	Harina
<i>Ambali</i>	Gachas delgadas	Harina
<i>Boorelu</i>	Muy frito	Harina
<i>Pelapindi</i>	Grano entero reventado y harina	Mezcla de partículas gruesas y harina
<i>Karappoosa</i>	Muy frito	Harina
<i>Thapala chakkalu</i>	Poco frito	Harina

(FAO, 1995)

Recientemente el sorgo ha sido utilizado en alimentos listos para comer o listos para cocinar como galletas, barras, pasteles, pancakes, cereales y productos fritos (Rakshit y Wang, 2016).

Es decir, la harina a partir del grano de sorgo ha proporcionado una buena base para los panes sin gluten y otros productos horneados como pasteles y galletas en aperitivos y pastas. Sin embargo, se ha considerado que el sorgo es inferior al trigo para hacer pasta debido a que no contiene gluten. En la calidad de la pasta influye tanto la calidad de la harina de sorgo como la del almidón. Debido a que la temperatura de gelatinización del almidón de sorgo es superior a la del trigo, es necesario agregar algún almidón gelatinizado a la harina de sorgo para obtener productos con buena calidad de cocción. Es preferible la utilización de sorgo blanco para la elaboración de productos de pasta y conviene tener un sorgo que dé un color análogo a la de la harina de trigo (Taylor y col., 2006).

Por otro lado, un uso tradicional para la harina de sorgo es la elaboración de tortillas. Aunque las tortillas se elaboran generalmente con maíz, el sorgo se ha utilizado en varios países centroamericanos y se ha demostrado que éste puede substituir parcial o totalmente el maíz amarillo en la producción de este alimento, cuando se procesa adecuadamente (Taylor y col., 2006).

#### 1.2.4 Composición química

Los granos de sorgo son particularmente ricos en almidón (56-75% del total de la materia seca) pero bajos en azúcares solubles, pentosanos, celulosa y hemicelulosa. El endospermo contiene 23 - 30% de amilosa y 70 - 77% de amilopectina pero las variedades cerosas o waxy contienen menos del 5% de amilosa. La cantidad de azúcares solubles va de 0.7 - 4.2% y azúcares reductores de 0.05 - 0.53%. Tal como se muestra en el Cuadro 4, el contenido de proteína cruda en granos de sorgo va de 10.4% en materia seca y esto es ligeramente más alto que en maíz (9.2%). Sin embargo, el contenido de grasa es ligeramente menor en el grano de sorgo (3.1%) respecto al del maíz (4.6%). La fibra cruda abarca rangos de 1-3.4% y las cenizas de 1.3 - 3.3%. Cabe mencionar, que el 70% del fósforo de este grano se encuentra como fitatos (Rakshit y Wang, 2016).

El sorgo difiere en su composición química del trigo, principalmente en su contenido y tipo de proteínas, ya que el sorgo carece de gluten (Rakshit y Wang, 2016).

Cuadro 4. Comparación de la composición nutrimental en 100 gramos de porción comestible de varios cereales con 12% de humedad

Cereal	Proteína (g) N*6.25	Grasas (g)	Carbohidratos (g)	Fibra cruda (g)	Cenizas (g)	Calcio (mg)	Hierro (mg)	Tiamina (mg)	Niacina (mg)	Riboflavina (mg)
Trigo	11.6	2.0	71.0	2.0	1.6	30	3.5	0.4	5.1	0.1
Arroz (café)	7.9	2.7	76.0	1.0	1.3	33	1.8	0.4	4.3	0.0
Maíz	9.2	4.6	73.0	2.8	1.2	26	2.7	0.4	3.6	0.2
Sorgo	10.4	3.1	70.7	2.0	1.6	25	5.4	0.4	4.3	0.2
Mijo perla	11.8	4.8	67.0	2.3	2.2	42	11.0	0.4	2.8	0.2

(Rakshit y Wang, 2016)

En el cuadro 5 se presenta la composición proximal de los granos de sorgo blanco y rojo crudos en donde se puede observar que el contenido de proteína es menor en el sorgo rojo que en el blanco, mientras que el contenido de lípidos es similar en ambos. En la determinación de fibra dietética, no se encontraron diferencias estadísticas entre las variedades (Gaytán-Martínez y col., 2017).

Cuadro 5. Composición proximal de sorgo rojo y blanco

Porcentaje (%)	Variedad	
	Rojo	Blanco
Humedad	10.62 ± 0.09 <sup>b</sup>	14.67 ± 0.03 <sup>a</sup>
Proteína	9.03 ± 0.01 <sup>b</sup>	10.46 ± 0.01 <sup>a</sup>
Lípidos	3.00 ± 0.03 <sup>a</sup>	2.70 ± 0.36 <sup>a</sup>
Cenizas	1.19 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.31 ± 0.08 <sup>a</sup>
Fibra dietaria total	17.23 ± 1.20 <sup>a</sup>	17.93 ± 0.80 <sup>a</sup>
Fibra dietaria insoluble	16.21 ± 0.58 <sup>a</sup>	17.79 ± 0.81 <sup>a</sup>
Fibra dietaria soluble	1.02 ± 0.28 <sup>a</sup>	0.21 ± 0.05 <sup>a</sup>
Almidón resistente (harina)	2.95 ± 0.15	2.21 ± 0.06

(Gaytán-Martínez y col., 2017; Khan y col., 2006)

El sorgo es una buena fuente de minerales y de vitamina B, tal como tiamina, riboflavina, vitamina B6, biotina y niacina (Cuadro 6) pero la refinación puede provocar la pérdida de estas vitaminas. Los principales minerales presentes en el grano de sorgo son el potasio y fósforo, mientras que el contenido de calcio es bajo (Rakshit y Wang, 2016).

Cuadro 6. Composición de minerales y vitaminas en el grano de sorgo

Minerales/Vitaminas	Sorgo	
	Entero	Decorticado
Calcio, %	0.05	0.03
Fósforo %	0.35	0.35
Potasio, %	0.38	0.37
Sodio, %	0.05	-----
Magnesio, %	0.19	0.02
Hierro, mg/kg	50.00	50.00
Cobalto, mg/kg	3.10	-----
Cobre, mg/kg	10.80	7.92
Manganeso, mg/kg	16.30	18.70
Zinc, mg/kg	15.40	-----
Tiamina, mg/kg	4.62	4.84
Riboflavina, mg/kg	1.54	1.76
Niacina, mg/kg	48.40	53.24
Piridoxina, mg/kg	5.94	10-34
Ácido pantoténico, mg/kg	12.54	12.76
Colina, mg/kg	761.20	-----
Biotina, mg/kg	2,90	-----
Ácido fólico, mg/kg	0.20	-----
Caroteno, mg/kg	1.32	-----

(Kulp y Ponte, 2000)

#### 1.2.5 Composición fitoquímica

El sorgo es una rica fuente de varios fitoquímicos que incluyen los compuestos fenólicos, antocianinas, fitoesteroles y policosanoles que forman parte de los metabolitos secundarios de las plantas o de los componentes integrales de la célula.



Los compuestos fenólicos pueden ser clasificados como ácido fenólico, flavonoides, y taninos. Los taninos condensados provocan un decremento del valor nutricional del grano del sorgo ya que enlazan las proteínas de la dieta, las enzimas digestivas, minerales como el hierro y vitaminas B (que incluyen la tiamina y la vitamina B6). Sin embargo, estos fitoquímicos tienen el potencial de tener un impacto significativo en la salud humana a través de la actividad antioxidante contra diferentes radicales libres (Rakshit y Wang, 2016).

La diversidad de los granos de sorgo está relacionada con sus propiedades intrínsecas, que incluyen el tipo de almidón, componentes no amiláceos y compuestos fenólicos. Estos últimos son dependientes del genotipo y afectan las características del pericarpio tales como color y presencia de una testa pigmentada (Vargas-Solórzano, 2014). En general las variedades de sorgo con testa pigmentada tienen un gran condensado de taninos (Rakshit y Wang, 2016), aunque pueden encontrarse variedades no pigmentadas con un contenido significativo de taninos. El sorgo sin testa es generalmente blanco y es preferido directamente para el uso de alimentos ya que éstos contienen una menor cantidad de compuestos fitoquímicos. Otros tipos de sorgo contienen testa, pero no contienen taninos, éstos pueden ser llamados sorgos amarillos, algunos pueden tener una apariencia de color rojizo. Sorgos de color marrón contienen una testa pigmentada y una mayor condensación de taninos y son generalmente resistentes a las aves. Sorgos rojos o marrones son los que tienen el mejor potencial nutraceutico ya que tienen una alta capacidad antioxidante impartida por los compuestos fenólicos, antocianinas y taninos (Rakshit y Wang, 2016).

En el Cuadro 7 se observa que las muestras de sorgo rojo contienen mayores niveles de fenoles totales en comparación con sorgo blanco: 47.86 y 34.78 mg GAE / g respectivamente (Gaytán-Martínez y col., 2017). La misma tendencia se observó para el contenido de taninos, donde el sorgo rojo tenía 20.54 mg GAE / g, mientras que la concentración en sorgo blanco era prácticamente insignificante (Gaytán-Martínez y col., 2017). El perfil fenólico del sorgo está fuertemente asociado al

genotipo; en el caso del sorgo blanco, los ácidos fenólicos unidos a las paredes celulares son la principal fuente de capacidad antioxidante (Awika y Rooney, 2004).

Cuadro 7. Componentes fenólicos y capacidad antioxidante en sorgo rojo y blanco crudo

Componente	Variedad de sorgo	
	Rojo	Blanco
Fenoles totales (mg de equivalente de ácido gálico/g de muestra)	47.86 ± 3.22	34.78 ± 4.18
Flavonoides (µg RE/g muestra)	85.50 ± 0.39	59.30 ± 2.51
Taninos condensados (mg de equivalente de catequina/ g muestra)	20.54 ± 0.97	0.89 ± 0.01
ABTS (ARA %)	86.34 ± 0.39	79.79 ± 0.57
DPPH (ARA %)	58.16 ± 0.73	71.66 ± 0.40

(Gaytán-Martínez y col., 2017)

Los componentes fenólicos más abundantes en sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) blanco y rojo son los flavonoides, los cuales están en mayor concentración en el sorgo rojo (Gaytán-Martínez y col., 2017). Los compuestos fenólicos pueden estar presentes en forma soluble libre o esterificada / eterificada, así como en forma insoluble, es decir, ligada a los constituyentes de la pared celular tales como carbohidratos, proteínas y fibras. Este arreglo natural en los genotipos de sorgo puede influir en la transición vítrea de polímeros y, por consiguiente, sobre las propiedades funcionales de los productos derivados del sorgo, tales como los extruidos (Vargas-Solórzano, 2014).

La capacidad antioxidante del grano de sorgo está influenciada por la variedad y el procesamiento. De manera general, el sorgo exhibe una elevada capacidad antioxidante debido a la capacidad de sus compuestos fenólicos para transferir H<sup>+</sup> del grupo hidroxilo unido al anillo B a radicales más inestables (Heim y col., 2002)

### 1.2.6 Limitaciones del uso de sorgo en alimentos

Tal como se muestra en el Cuadro 8, en comparación con las proteínas de otros cereales, la calidad proteica del grano de sorgo es pobre debido al bajo contenido de aminoácidos esenciales tal como la lisina y treonina (Ensmiger, 2000).

Por otro lado, el sorgo es pobremente digerido por infantes y por la población en general (Rakshit y Wang, 2016).

Las proteínas del sorgo pueden clasificarse en general en proteínas prolaminas y no prolaminas. Las kafirinas son prolaminas y se consideran como las principales proteínas de almacenamiento, éstas contienen altos niveles de prolina y glutamina y son solubles en solventes no polares como los alcoholes acuosos (Shewry y Tatham 1990). Las kafirinas representan del 77% al 82% de la proteína en el endospermo, mientras que las demás proteínas (albúminas, globulinas y glutelinas) constituyen aproximadamente el 30% de las proteínas (Belton y col. 2006).

Cuadro 8. Perfil de aminoácidos esenciales en el grano del sorgo y maíz

<b>Aminoácido (mg/g de proteína)</b>	<b>Grano de sorgo</b>	<b>Maíz</b>
Histidina	21	27
Isoleucina	40	38
Leucina	129	133
Lisina	22	27
Metionina y cisteína	30	41
Fenilalanina y tirosina	86	92
Treonina	33	37
Triptófano	13	9
Valina	47	46

(Ensmiger, 2000)

Las kafirinas se clasifican como  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  o  $\delta$  según el peso molecular y la solubilidad. Dependiendo de si es harinosa o vítrea, el endospermo de sorgo contiene

aproximadamente del 66% al 84% de  $\alpha$ -kafirina, del 8% al 13% de  $\beta$ -kafirina, y del 9% al 21% de  $\gamma$ -kafirina y niveles bajos de  $\delta$ -kafirinas. Las  $\alpha$ -kafirinas se dividen en 2 grupos de polipéptidos con pesos moleculares (Mw) de 23 y 25 kDa. Las  $\beta$ -kafirinas tienen un Mw de aproximadamente 18 kDa. Las  $\gamma$ -kafirinas tienen un Mw de aproximadamente 20 kDa mientras que las  $\delta$ -kafirinas tienen un Mw de aproximadamente 13 kDa (Mesa y col., 2010).

Las kafirinas se encuentran en cuerpos de proteínas esféricas, que están incrustadas en una matriz de proteínas de glutelina, y están rodeadas de gránulos de almidón como se muestra en la Figura 12 (Mesa y col., 2010).

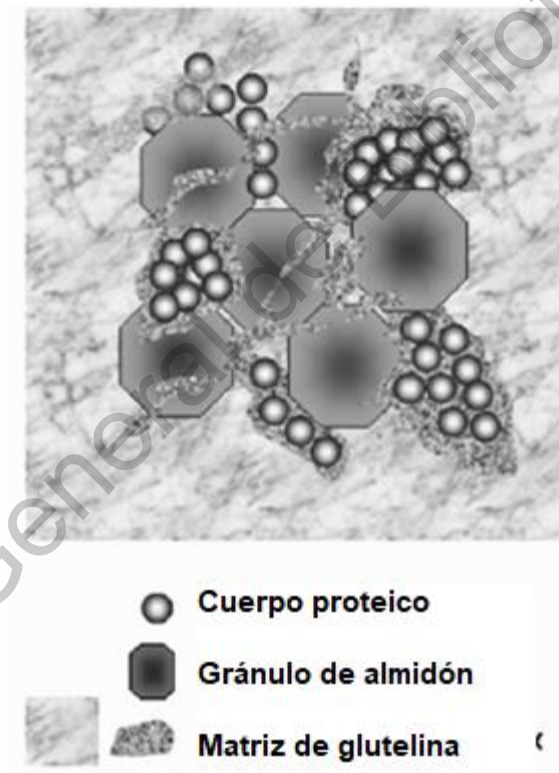


Figura 12. Cuerpos de proteína de sorgo en relación con el almidón y la matriz de glutelina (Mesa y col., 2010)

Los cuerpos de las proteínas tienen un diámetro de 0.4 a 2  $\mu\text{m}$  con una "capa" externa compuesta principalmente por kafirinas  $\beta$  y  $\gamma$  ya que éstas forman enlaces

disulfuro intermoleculares e intramoleculares y están altamente reticuladas. El interior está compuesto predominantemente de  $\alpha$ -kafirina (Figura 13) (Mesa y col., 2010).

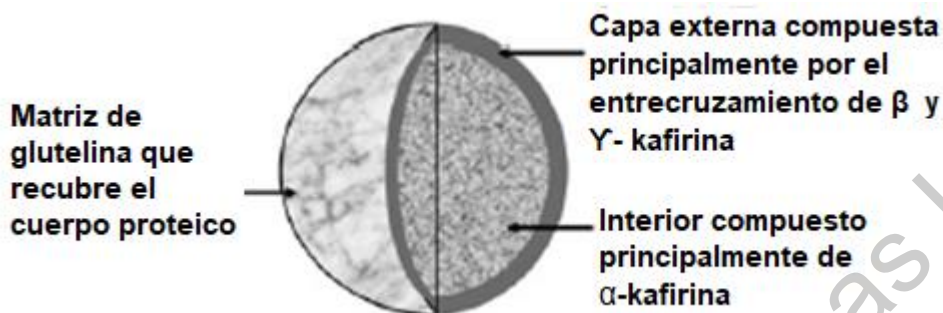


Figura 13. Esquema del cuerpo de proteína del sorgo (Mesa y col., 2010)

Múltiples evidencias indican que el entrecruzamiento de kafirinas y la formación de enlaces disulfuro son una de las principales causas de la disminución de la digestibilidad de las proteínas del grano de sorgo (Chiquito-Almanza y col., 2011). Afortunadamente, se ha demostrado que la acción mecánica del proceso de extrusión permite degradar simultáneamente el almidón y romper los cuerpos de proteínas que limitan la funcionalidad y la digestibilidad de las proteínas del sorgo (Mesa y col., 2012).

Otro factor anti-nutricio presente en el sorgo son los taninos condensados (TC). Los taninos condensados son compuestos polifenólicos que afectan negativamente la calidad nutricional del sorgo al unir y precipitar proteínas, lo que hace que éstas sean indigestibles (Ratnavathi y Komala, 2016). Además, los productos obtenidos del sorgo pueden tener un efecto sensorial, ya que los TC tienen un sabor amargo y astringente (Dykes y Rooney, 2006). Sin embargo, la nixtamalización puede disminuir los niveles totales de taninos y antocianinas, aunque también puede afectar negativamente la actividad antioxidante (López-Martínez y col., 2011).

Además, el 70% del fósforo de este grano se encuentra bajo forma de fitatos (Rakshit y Wang, 2016). Los fitatos representan una clase compleja de compuestos fosfóricos que se dan en la naturaleza y pueden influir notablemente en las propiedades funcionales y nutricionales de los alimentos. El ácido fítico tiene una fuerte capacidad

de enlace para formar complejos con cationes plurivalentes y proteínas. La mayor parte de los complejos fitato-metálicos son insolubles a un pH fisiológico y por tanto convierten varios minerales complejos en biológicamente indisponibles para los animales y seres humanos (FAO, 1995).

### 1.3 Amaranto

#### 1.3.1 Generalidades

*Amaranthus* es un género de plantas herbáceas y anuales perteneciente a la familia *Amaranthaceae* (**Cuadro 9**). Las especies de amaranto más importantes, que se cultivan y se consumen son *Amaranthus hypochondriacus* en México, *Amaranthus cruentus* en Guatemala y *Amaranthus caudatus* en Perú y otros países andinos (Bressani, 2003).

Cuadro 9. Clasificación botánica del amaranto cultivado

Reino	Vegetal
División	<i>Embryophyta Siphonograma</i>
Subdivisión	<i>Angiospermae</i>
Clase	<i>Dicotyledonae</i>
Subclase	<i>Archiclomidae</i>
Serie	<i>Centrospermae</i>
Familia	<i>Amaranthaceae</i>
Género	<i>Amaranthus</i>
Especies cultivadas para grano	<i>hypochondriacus, cruentus y caudatus</i>

(Tapia, 1997)

El amaranto tiene una estructura diferente a la de los otros cereales, las semillas son de color crema a dorado con forma de lenteja y diámetro aproximado de 0.9- 1.7 mm. El embrión rodea al perispermo el cual está compuesto de gránulos de almidón. La radícula, el hipocotilo, y los dos cotiledones se pueden observar bajo el microscopio. El embrión está cubierto por el endospermo y el pericarpio que son muy parecido a la fracción de salvado en los cereales (Figura 14) (Amico y Schoenlechner, 2016).

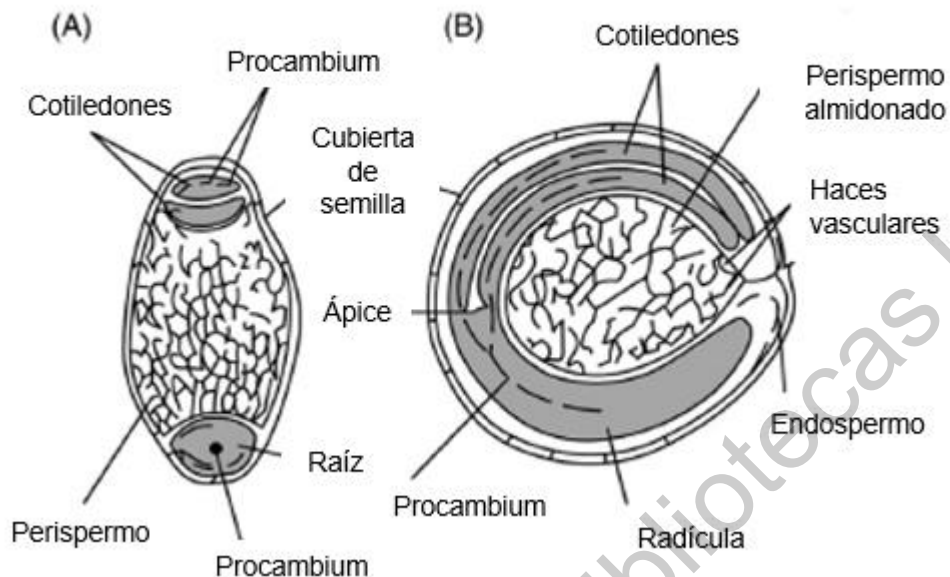


Figura 14. Semillas de amaranto cortadas A) Longitudinalmente B) Secciones  
(Amico y Schoenlechner, 2016)

Las capas externas son ricas en grasas y proteínas. Debido a este hecho y la mayor proporción de embrión (alrededor del 25%), el amaranto contiene más grasa y un poco más de proteínas en comparación con otros cereales verdaderos (Amico y Schoenlechner, 2016).

Existe una gran variedad de métodos de procesos de calor que se pueden aplicar al grano de amaranto para su consumo. Estos procesos pueden afectar el nivel de fitoquímicos, actividad antioxidante, propiedades funcionales y valor nutricional de alimentos (Muyonga y col., 2013). Al calentarse, las semillas de amaranto pueden explotar. Se cree que este estallido ocurre cuando la presión interna causada cuando la evaporación del agua excede la resistencia a la tracción de la cubierta de la semilla (Murakami y col., 2014).

### 1.3.2. Producción de amaranto

Se cree que el amaranto es originario de América Latina y América Central (Santra y Schoenlechner, 2017). La mayor parte del cultivo de amaranto se concentraba en

los valles de tierras altas, como los de la Sierra Madre, los Andes y el Himalaya (Myers, 1996).

Existe evidencia que *Amaranthus cruentus* fue cultivado desde hace 6000 años en América Central, *Amaranthus hypochondriacus* fue cultivado en México desde hace aproximadamente 1500 años mientras que, el tipo *Amaranthus caudatus* se cultivó en los valles montañosos andinos de América del Sur (Sauer, 1993). Actualmente, la producción de *A. cruentus* se limita a las montañas andinas debido a su adaptabilidad a una mayor elevación. *Amaranthus hypochondriacus* es el grano de amaranto más común, ya que está más adaptado a sitios bajos, y es cultivado en las principales regiones productoras del mundo (Myers, 1996). El grano de amaranto fue un alimento importante en las dietas y culturas aztecas, mayas e incas hasta el siglo XVII cuando los españoles conquistaron. A mediados del siglo XX, el cultivo del amaranto en grano había disminuido hasta el punto en que sólo se cultivaba en pequeñas parcelas en México, el altiplano andino y en las estribaciones del Himalaya de India y Nepal (Santra y Schoenlechner, 2017).

Actualmente, el grano de amaranto se cultiva comúnmente en México, Perú y otros países andinos y en pequeña escala en países de América Central y del Sur. También se cultiva como hortalizas en Australia, África y Asia, especialmente en Nepal. Los habitantes de las regiones montañosas del norte y sur de la India lo consumen como una verdura de hoja verde (Santra y Schoenlechner, 2017).

### 1.3.3. Composición química del amaranto

El amaranto tiene el mayor contenido de proteína entre los pseudocereales, consistentes en 40% de albúminas, 20% globulinas, 25-30% glutelinas y 2-3% de prolaminas, por lo que contienen más aminoácidos esenciales (Cuadro 10) como la lisina, metionina, cisteína e histidina, con una digestibilidad de 68.8-75.4% (Taylor y col., 2017).



Cuadro 10. Aminoácidos esenciales del grano de amaranto *Amaranthus hypochondriacus*

Aminoácido	g/100 g de proteína
Cisteína	2 – 3-9
Isoleucina	2.8-3,8
Leucina	5-5.8
Lisina	3.2-6
Metionina	0.6-1.6
Fenilalanina	3.8-4.5
Treonina	2.6-4.3
Triptófano	1.1-4
Tirosina	3.1-4
Valina	3.2-4.2
Metionina-cisteína	2.6-5.5
Fenil-tirosina	6.9-8.5

(Corke y Cai, 2016)

Además, como se muestra en el Cuadro 11, el amaranto tiene un mayor contenido de grasa que otros cereales verdaderos. Los ácidos grasos más abundantes son ácido linoleico (33-55.9%), ácido oleico (18.7-38.9%), ácido palmítico (14-26%) y ácido esteárico (0.2-1.97%). La proporción de ácidos grasos son saturados 20-30% y poliinsaturados en un 33-50%, un mayor nivel nutricional (Taylor y col., 2017).

De los carbohidratos un 48-69% es almidón, la proporción de amilosa es menor que en los demás cereales, tiene una rápida digestibilidad y un índice glucémico menor que el almidón del trigo (Taylor y col., 2017).

La mayor parte de la fibra dietética es insoluble, predominando polisacáridos pécticos y arabinanos, aproximadamente 30.3% de arabinosa y 22.2% de ácido galacturónico, bajas proporciones de glucosa y xilosa se pueden encontrar en esta fracción. Sin

embargo, los xiloglucanos son el mayor componente de la fibra soluble (Taylor y col., 2017). Además, el amaranto es una buena fuente de vitaminas del complejo B y de vitamina C. Es más rico en minerales que otros cereales y es buena fuente de minerales (Cuadro 11).

Cuadro 11. Comparación de la composición proximal entre los granos de amaranto con otros cereales

<b>Composición</b>	<b>Amaranto</b>	<b>Trigo</b>	<b>Maíz</b>	<b>Arroz</b>	<b>Sorgo</b>
Carbohidratos	59.2	66.9	67.7	75.4	70.7
Proteína cruda	16.6	14	10.3	8.5	10.4
Grasas	7.2	2.1	4.5	2.1	3.1
Fibra cruda	4.1	2.6	2.3	0.9	2
Cenizas	3.3	1.9	1.4	1.4	1.6
Humedad	9.6	12.5	13.8	11.7	14.6

(Corke y Cai., 2016) (Rakshit y Wang, 2016)

En el amaranto el calcio está presente 5 veces más que en el trigo y es rico en Fe, P, K y Na, en menor cantidad Zn, Cu y Mn (Taylor y col., 2017). Por otro lado, se ha demostrado que, en el amaranto explotado, las cuantificaciones de los niveles de algunos minerales pueden aumentar hasta casi el doble (Murakami y col., 2014).

**Cuadro 12.** Efecto del explotado en algunos microelementos del amaranto

Elemento	Amaranto crudo (A)	Amaranto explotado (B)	Recuperado (B/A)
Cr	6.8±1.2 <sup>a</sup>	13.3±1.7 <sup>b</sup>	196
Zn	3,510±41 <sup>a</sup>	3,780±147 <sup>b</sup>	108
Fe	10,700±112 <sup>a</sup>	11,400±84 <sup>b</sup>	107
Co	11.7±0.1 <sup>a</sup>	15.7±4.2 <sup>b</sup>	134
Ni	30.4±1.9 <sup>a</sup>	45.4±3.4 <sup>a</sup>	149
Cu	752±28 <sup>a</sup>	807±3 <sup>b</sup>	107
Zn	3,110±44 <sup>a</sup>	3,380±253 <sup>a</sup>	109
Se	40.4±3.0 <sup>a</sup>	39.1±0.5 <sup>a</sup>	97
Mo	59.6±8.2 <sup>a</sup>	69.2±7.3 <sup>b</sup>	116

(Murakami y col., 2014)

La cocción y el estallido en el *A. cruentus* y *A. caudatus* puede disminuir la presencia de factores antinutricionales como los fitatos, los inhibidores de tripsina y permite el aumento de la biodisponibilidad de los nutrientes (Areas y col., 2016)

#### 1.3.4 Composición fitoquímica del amaranto

Por otro lado, el amaranto contiene ácidos fenólicos, flavonoides y glicósidos; y una menor cantidad de inhibidores de proteasa que otros cereales (Taylor y col., 2017).

El ácido cafeico, el ácido p-hidroxibenzoico y el ácido ferúlico son los principales compuestos fenólicos encontrados en los granos de amaranto (Singh y col., 2019).

Se ha reportado que la harina de semilla de amaranto contiene polifenoles (flavonoides) con una capacidad antioxidante relativamente alta. Por esta razón, el amaranto ha sido recomendado en la dieta (Gorinstein y col., 2007).

Según algunos estudios, el contenido de fenoles totales no se ve afectado por el proceso de explotado (Cuadro 13). Sin embargo, sí se puede observar un aumento en el contenido de flavonoides con respecto al amaranto crudo y asado, lo cual se le ha atribuido a la capacidad de extraer los flavonoides que se encontraban unidos en la pared celular y a la desactivación de enzimas oxidativas endógenas (Myonga y col., 2013)

Cuadro 13. Contenido de fenoles totales, contenido de flavonoides totales y DPPH en *Amaranthus hypochondriacus* y *A. cruentus* L.

Proceso	Contenido de fenoles totales (mg GAE/g)	Flavonoides totales (mg CE/g)	Actividad antioxidante DPPH (mg VCE/g dw)
<b><i>A. caudatus</i></b>			
<b>Crudo</b>	3.63 ± 0.08 <sup>ab</sup>	0.54 ± 0.13 <sup>b</sup>	0.24 ± 0.12 <sup>bc</sup>
<b>Asado</b>	3.93 ± 0.22 <sup>a</sup>	1.06 ± 0.18 <sup>b</sup>	0.56 ± 0.07 <sup>a</sup>
<b>Explotado</b>	3.41 ± 0.32 <sup>ab</sup>	0.93 ± 0.16 <sup>a</sup>	0.31 ± 0.13 <sup>bc</sup>
<b><i>A. hypochondriacus</i></b>			
<b>Crudo</b>	3.34 ± 0.22 <sup>b</sup>	0.47 ± 0.09 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>c</sup>
<b>Asado</b>	3.70 ± 0.33 <sup>ab</sup>	0.54 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.33 ± 0.08 <sup>b</sup>
<b>Explotado</b>	2.99 ± 0.29 <sup>b</sup>	0.78 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.13 ± 0.07 <sup>c</sup>

(Muyonga y col., 2013)

### 1.3.5 Usos del amaranto

Dadas las características nutricionales y fitoquímicas del amaranto, es un ingrediente con potencial funcional para el enriquecimiento o fortificación de alimentos con bajo contenido de proteínas, como lo son las botanas.

Tradicionalmente, las semillas de amaranto se cocinaban, tostaban, reventaban o se formaban hojuelas para consumo humano. Las hojas de la planta se consumían cocidas como un vegetal como la espinaca (Corke y col., 2016)

Debido a la estructura anatómica de las semillas de amaranto, el proceso de reventado es de gran interés ya que los granos de amaranto reventados y extruidos se utilizan a menudo como el ingrediente principal para la elaboración de bocadillos, cereales para el desayuno y barras crujientes (Ramos-Díaz y col., 2015)

El almidón de amaranto se puede usar en muchos alimentos como natillas, pastas y ensaladas y en aplicaciones no alimentarias como cosméticos, películas biodegradables, recubrimientos de papel y almidón de lavandería. Los almidones modificados de *A. viridis* también tienen el potencial de reemplazar parcialmente la grasa en alimentos ricos de ésta como la mayonesa y la crema para ensaladas. La harina de amaranto se usa como espesante en salsas, sopas y guisos. Las harinas de amaranto desgrasadas pueden preferirse a las harinas de grasa total, ya que tienen una mejor estabilidad de sabor y pueden comercializarse como productos bajos en grasa o en calorías. Además, el aceite extraído se puede utilizar para otros fines y estas harinas tienen una funcionalidad mejorada. La harina de amaranto también se usa para preparar galletas, panecillos, panqueques, pastas, panes planos, productos extruidos y otros alimentos libres de gluten (Singh y col., 2019)

#### 1.4 Fundamentos de extrusión

La cocción por extrusión es un proceso térmico en el que se aplica alta temperatura, presión y fuerza de corte a una masa/alimento sin cocer (Jing y Chi, 2013), es decir, se podría considerar a la extrusión como un proceso de cocción continuo.

En 1797, Joseph Bramah patentó el primer proceso de extrusión para la fabricación de tubos de plomo y los siguientes 250 años esta tecnología se utilizó en la fabricación de plásticos, metales moldeados y materiales sintéticos, sin embargo, a partir de 1970, fue cuando la extrusión tuvo un gran uso en la industria alimentaria gracias a su capacidad de mezclar diversos ingredientes de alimentos y darle novedosas figuras, además de que puede ser utilizado en el desarrollo de alimentos funcionales (Brenan y Marcilla, 2012).

Un extrusor se compone de un sistema de alimentación (tolva), un sistema de fusión y un sistema de bombeo constituido por un tornillo de Arquímedes dentro de un cilindro caliente. Existen dos tipos principales de tornillos: tornillo simple y tornillo de

engrane entrelazado (contrarrotatorios o co-rotatorios) como se muestra en la Figura 15 (Beltran y Marcilla, 2012). Durante la extrusión, el tornillo gira constantemente dentro del cilindro, gracias a la presión continua y la temperatura empleada el alimento es impulsado hacia el final del tornillo en donde el producto es forzado a salir a través de un orificio comúnmente llamado dado (Brenan y col., 2012). Se considera que hay dos formas de extrusión: fría (debajo 70 ° C) y caliente (por encima de 70 ° C) (Brenan y Marcilla, 2012).

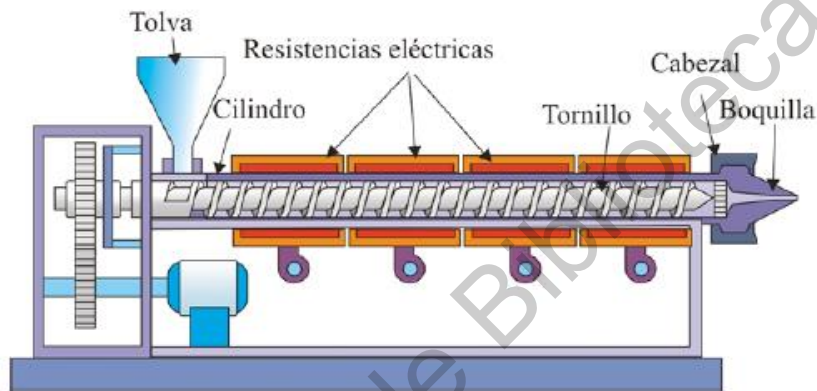


Figura 15. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo (Beltran y Marcilla, 2012)

El extrusor se puede considerar dividido en tres zonas las cuales se pueden apreciar en la Figura 16. La zona de alimentación es la región más cercana a la tolva y en la cual la profundidad del canal en el tornillo es máxima. Tiene como objetivo principal compactar el alimento en una forma sólida y densa además transportarlo hacia la siguiente zona a una velocidad adecuada. La zona de transición o compresión es la zona intermedia en la cual la profundidad del canal disminuye de modo más o menos gradual. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que pudiera quedar atrapado se escapa del material hacia la tolva de alimentación. Además, en esta zona ocurre la fusión del material. La zona de dosificado se sitúa al final, en la parte más cercana a la boquilla y tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante. En esta zona el material fundido es homogenizado y presurizado para forzarlo a atravesar a presión la boquilla de conformado. Se debe tener en cuenta que esta asignación de funciones a cada una de las zonas de la

extrusora no es estricta, por ejemplo, el transporte, presurización y homogenización se producen a lo largo de toda la extrusora (Beltran y Marcilla, 2012).

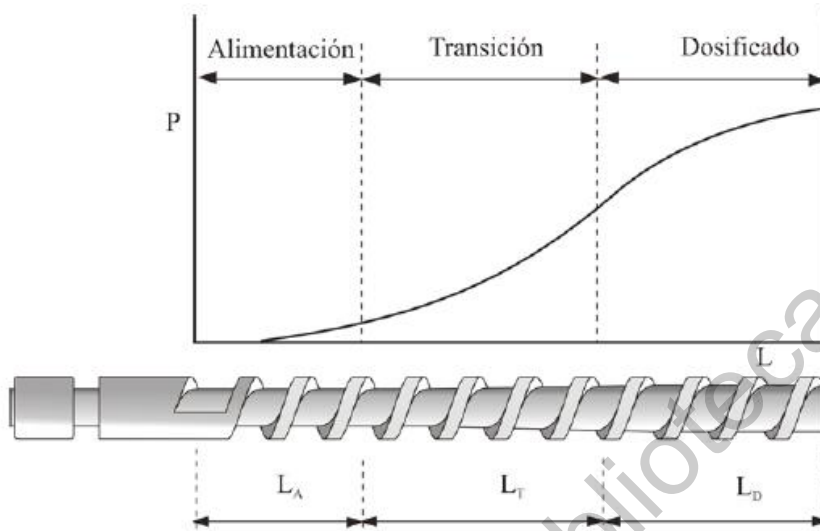


Figura 16. Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas (Beltran y Marcilla, 2012).

Es importante mencionar que la calidad de los productos finales puede variar y depender de algunos parámetros como la composición de materias primas, la alimentación, la humedad, la temperatura del barril, la velocidad del tornillo, la configuración del tipo extrusión y tornillo (Brenan y Marcilla., 2012).

Unas de las ventajas de utilizar el proceso de extrusión son los altos rendimientos que se obtienen en una sola etapa de elaboración además de que permite cocer y dar forma al producto. Con la extrusión se pueden tratar diversos ingredientes crudos en diferentes condiciones de elaboración, lo que permite la manufactura de numerosos alimentos (Boucher, 1991).

Durante el proceso de extrusión, el material que se elabora se cuece a temperaturas elevadas durante un breve tiempo. El almidón se gelatiniza y se desnaturaliza la proteína, con lo cual mejora su digestibilidad. Pueden inactivarse elementos anti-nutricionales presentes. Se destruyen en gran parte los microorganismos y por tanto aumenta la duración del producto (FAO, 1995). Por otro lado, los sistemas de

extrusión dan a la materia prima una textura y forma que incrementan la aceptabilidad por el consumidor (Boucher, 1991).

### 1.5 Nixtamalización

Del náhuatl nixtli, cenizas, y tamalli, masa, el proceso de la nixtamalización se ha transmitido de generación en generación en Mesoamérica, y todavía se utiliza como en tiempos prehispánicos. Se inicia con la adición de dos partes de una solución de cal aproximadamente al 1% a una porción de maíz. Esta preparación se lleva a ebullición de 50 a 90 minutos, y se deja remojando en el agua de cocción de 14 a 18 horas. Posterior al remojo, el agua de cocción, conocida como nejayote, se retira y el maíz se lava dos o tres veces con agua, sin retirar el pericarpio ni el germen del maíz. Se obtiene así el llamado maíz nixtamalizado o nixtamal, que llega a tener hasta 45% de humedad (Paredes y col., 2009). Como resultado de esta hidrólisis termo-alcalina se mejora la concentración de calcio, así como la biodisponibilidad de proteínas, vitaminas y aminoácidos (López-Martínez y col., 2011).

De acuerdo a algunos estudios, la nixtamalización de los granos de sorgo, ha permitido obtener una harina con un contenido de fibra, calcio y proteína significativamente más alto en comparación con la harina no nixtamalizada (Ocheme y Mikailu, 2011; Serna-Saldivar y col., 1988) una mayor biodisponibilidad de la proteína (Cabrera, 2015). Además, de una reducción en el contenido de taninos (Cabrera, 2015) y cianuro (Ocheme y Mikailu, 2011). Sin embargo, es importante mencionar que, dependiendo de las condiciones en que se lleven a cabo la nixtamalización, este proceso podría afectar su capacidad antioxidante. Se ha demostrado que las condiciones óptimas de nixtamalización para mantener una significativa capacidad antioxidante y disminución del contenido de taninos condensados, es al emplear 1.13% de cal y 31,1 min de cocción (Gaytán-Martínez y col., 2017).



## **2. HIPÓTESIS**

Al controlar las condiciones de extrusión y horneado de harina nixtamalizada de sorgo y amaranto, se obtendrá una botana con características sensoriales aceptables para consumidores (18-40 años de edad) del estado de Querétaro; con menor contenido de grasa, mayor contenido de proteína, mejor capacidad antioxidante y mayor contenido de fibra dietética, en comparación con una botana comercial de segunda generación.

Dirección General de Bibliotecas UQO

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 General

Elaborar una botana extruida de segunda generación tipo churrito a base de harina de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) nixtamalizado y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y evaluar sus atributos sensoriales, valor nutrimental y su potencial nutracéutico

#### 3.2 Específicos

- Establecer las condiciones de extrusión para obtener una botana con características sensoriales aceptables para el consumidor.
- Identificar aquellos factores del proceso de extrusión que afectan la textura del producto y determinar las interacciones entre éstos.
- Caracterizar físico-química, nutricional y nutracéuticamente la botana con mayor aceptación sensorial y realizar una comparación contra la botana comercial.
- Evaluar el efecto que tiene el proceso de extrusión y horneado sobre las propiedades físicas, el contenido nutricional y nutracéutico de la materia prima empleada (sorgo y amaranto).

#### 4. METODOLOGÍA

En la Figura 17 se muestra la estrategia general de experimentación.

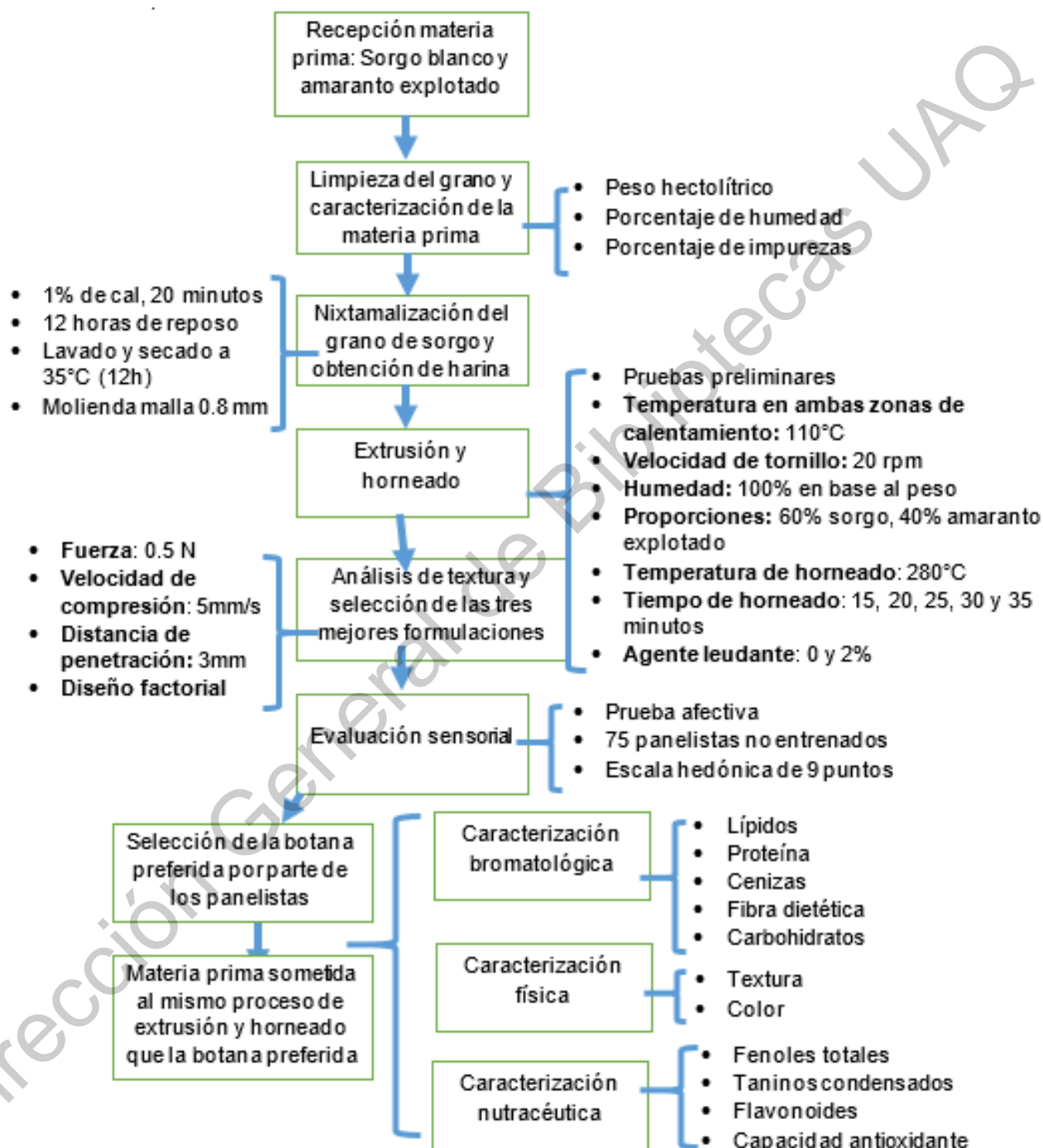


Figura 17. Estrategia general de experimentación

#### 4.1 Materiales

Se empleó sorgo blanco (*Sorghum L. Moench*) y amaranto explotado (*Amaranthus hypochondriacus*) como materia prima, se añadió propionato de sodio como conservador, monoestearato de glicerilo como emulsificante y saborizantes obtenidos de la central de Abastos en el estado de Michoacán.

#### 4.2 Caracterización de la materia prima

##### 4.2.1 Índice de impurezas del grano de sorgo

Los granos de sorgo fueron limpiados a través de tamices y se almacenaron en un contenedor hermético hasta su uso. Se calculó el índice de impurezas mediante la metodología descrita en la NMX-FF-037-1994. Se pesaron 500 g de sorgo y se pasaron a través de varios tamices con el fin de limpiarlo y nuevamente se volvió a pesar. Esto se realizó por triplicado. Se calculó el índice de impurezas empleando la fórmula que se presenta a continuación:

$$\% \text{ Impurezas} = \frac{\text{Peso de impurezas (g)}}{\text{Peso original de la muestra (g)}} \times 100$$

##### 4.2.2 Determinación de la humedad del grano de sorgo

Se utilizaron charolas de aluminio previamente puestas a peso constante. Se pesó cada charola de aluminio y se anotó su respectivo peso, posteriormente, se pesaron 3 gramos de sorgo y se colocaron en un horno a 110°C durante 11 horas, hasta que el peso fue constante. Esto se realizó por triplicado.

Se calculó el porcentaje de humedad de acuerdo a lo establecido por la NOM-147-SSA1-1996:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{Mh - Ms}{Mo} \times 100$$

Donde Mh= peso del crisol con muestra húmeda, Ms= peso del crisol con muestra seca y Mo= Peso de la muestra húmeda.

#### 4.2.3 Peso hectolítrico

Se siguió la metodología descrita por la NMX-FF-037-1994. Se colocó un recipiente cilíndrico de 50 mL en una balanza y se taró, posteriormente se dejó caer el sorgo sin impurezas de manera constante en el centro del recipiente a una altura de 5 cm hasta que el recipiente se derrame, posteriormente se retiró el exceso con una regla circular, evitando golpear el recipiente y se volvió registrar el peso. Este proceso se realizó por triplicado. Se calculó el peso hectolítrico en kg/hL.

#### 4.3 Preparación de la materia prima

##### 4.3.1 Nixtamalización

Se llevó a cabo la nixtamalización de los granos de sorgo blanco. Para esto, se colocaron 3 litros de agua por cada kilogramo de sorgo en una olla y se llevaron a ebullición (92°C) en una estufa, posteriormente se adicionó 1% de cal (hidróxido de calcio) y se agitó. Posteriormente se adicionó el sorgo y se sometió a cocción durante 30 minutos. Se dejó en reposo durante 12 horas. Transcurrido ese tiempo, se tomó una muestra de nejayote (agua de nixtamal) y se le midió el porcentaje de sólidos y pH (Sánchez, 2014). El nixtamal se lavó con 2 L de agua en un recipiente y posteriormente se retiró del agua con un colador (Figura 18).



Figura 18. Nixtamalización y determinación del porcentaje de sólidos en el sorgo

##### 4.3.2 Obtención de harina de sorgo nixtamalizado

Los granos nixtamalizados se dejaron secar en un deshidratador con circulación de aire forzado (Food Dehydrator, de Excalibur Products) a 35°C durante 12 horas (Fig 19A), Transcurrido ese tiempo, se pasaron a un molino de martillos Pulvex-200

(martillos Pulvex, S.A de C.V., México, D.F.) usando una malla de orificios 0.8 mm (Figura 19B). Una vez tamizada la harina, ésta fue colocada en frascos ámbar y refrigeradas hasta su análisis.

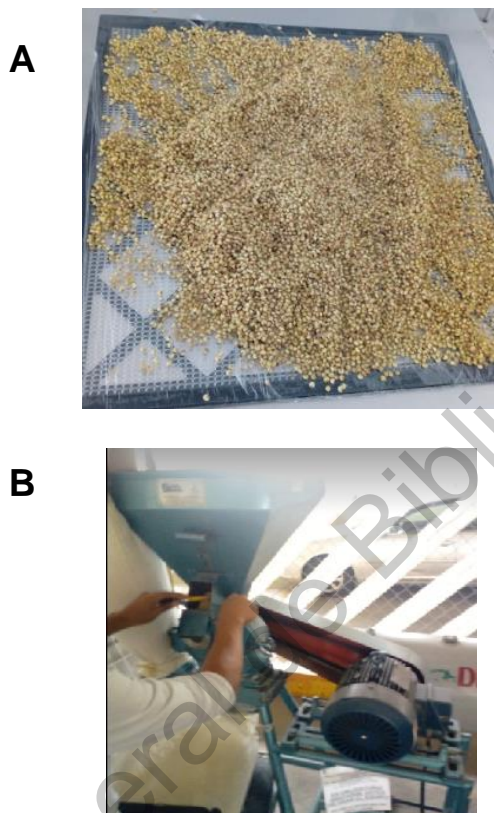


Figura 19. Obtención de la harina de sorgo A) Deshidratado de los granos de sorgo  
B) Molienda de los granos en un molino de martillos

#### 4.3.3 Diseño experimental y condiciones de extrusión

Se realizó una serie de diseños estadísticos preliminares (Cuadro 14) en los que se evaluaron la temperatura de extrusor en la segunda zona de calentamiento (110 y 120°C), el porcentaje de humedad (65, 80 y 100%), la cantidad de emulsificante (0.1 y 0.2%), el porcentaje de sorgo (60 y 70%) y el tipo de partícula del amaranto (entero y molido). Para la formulación se empleó una relación de 60% sorgo y 40% amaranto entero con un porcentaje de humedad del 1:1 al que se le adicionó 0.2% de monoesterato de glicerilo, 0.1% de ácido cítrico, 0.05% de propionato de sodio y 4% de una mezcla de especias (chile, cebolla, ajo, sal). La mezcla se procesó en el

extrusor (Desarrollado en CICATA-IPN unidad Querétaro, Morales-Sánchez, 2010, patente MX/a/2007/016262) utilizando un tornillo sin fin L/D=21 pulgadas, a una velocidad de 20 rpm. Se utilizó una temperatura de 110°C en la primera zona de calentamiento, la mezcla se alimentó de forma manual, uniforme y constante y se empleó un dado con un orificio de 6 mm de diámetro.

Las botanas pre-cocidas fueron inmediatamente horneadas en un horno eléctrico (*General Electric*) a 210° C a diferentes tiempos de horneado. Se llevaron a cabo varios diseños de experimentos aleatorizados como se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Diseño de experimentos de pruebas preliminares

Prueba	Diseño	Velocidad del tornillo (rpm)	Temperatura del extrusor (°C)	Sorgo (%)	Amaranto (molienda)	Porcentaje de agua en la	Emulsificante (%)	Chile espolvoreado (%)	Conservador (%)	Agente leudante (%)	Otros aditivos	Temperatura de horneado (°C)	Tiempo de horneado (min)
1	Factorial 2 a la 2	20	110	60	Entero	60	0.1 0.2	0	0.05	0	2	280	30 y 40
2	Factorial 2 a la 2	20	110 120	60 70	Entero	60	0.2	0	0.05	0	2	280	30
3	Diseño 3x2x2	20	110	60	Entero Molido	60 85	0.2	0	0.05	0	2	280	30, 40 y 50
4	Diseño 2x2x3x4	20	110	60	Entero Molido	60 85 1:1	0.2	0 1	0.05	0	2	280	30, 40 50 y 60
5	Diseño 2x5	20	110	60	Entero	1:1	0.2	0	0.05	0 2	2	280	15, 20, 25, 30 y 35

\*El porcentaje de agua presentado es en base al peso de la harina de sorgo y amaranto. La proporción 1:1 se refiere por cada gramo de harina se añadió un mililitro de agua.

A las muestras obtenidas se les hizo un análisis de textura (Sección 4.4.2.1) y en base a estos resultados, se eligieron las tres mejores formulaciones (las que tenían una fuerza máxima menor y una mayor crujencia) y fueron presentadas en la evaluación sensorial. Cada tratamiento se llevó cabo de manera aleatorizada e independiente.

#### 4.3.4 Evaluación sensorial

Una vez seleccionadas las tres mejores formulaciones, se llevó a cabo una prueba sensorial de aceptación cuantitativa en la sala de evaluación sensorial CAIDEP-UAQ (Figura 20 A).

Antes de realizar el análisis se verificó que las muestras cumplieran con la norma de inocuidad (Cuadro 15) establecidas en PROY-NOM-216-SSA1-2002.

Cuadro 15. Límites máximos microbiológicos y de materia extraña en botanas con chile y especias no irradiadas.

<b>Determinación</b>	<b>Límite máximo</b>
Coliformes totales	50 UFC/g
Salmonella spp	Ausente en 25 g
Fragmentos de insectos	Con chile: 60
Pelos de roedor	Sin chile: 50
Fragmentos de insectos	Con chile: 2
Excretas y cualquier otra materia extraña	Sin chile: 1

Se reunieron a 75 evaluadores no entrenados entre 18-40 años de la ciudad de Querétaro de ambos sexos. Sin embargo, 3 de ellos dejaron atributos sin responder, por lo que fueron descartados para los análisis posteriores. Cada participante evaluó las tres muestras de botanas elaboradas a partir de sorgo y amaranto que presentaron un menor valor de fuerza máxima y una mayor crujencia. Estas muestras



fueron previamente codificadas con números aleatorios de tres dígitos y fueron presentadas a cada panelista de forma aleatoria y balanceada con el fin de evitar sesgo posicional (Meilgaard, 2016). Se evaluaron 25 g de la botana y, entre cada muestra, se le pidió a los participantes que enjuagaran el paladar con agua y pan blanco.

Las muestras fueron empaquetadas en bolsas de papel celofán y se empleó agua y pan blanco como limpiador (Figura 20 B).

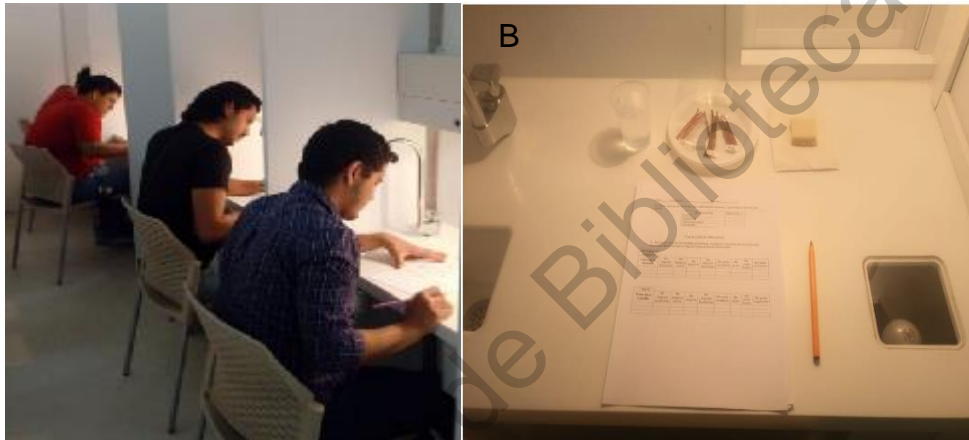


Figura 20. Prueba sensorial llevada a cabo en CAIDEP-UAQ A) Panelistas no entrenados B) Muestras aleatorizadas presentadas

La indicación para los panelistas fue apegarse a los parámetros descritos en el formato de evaluación, consumiendo pedacitos de pan blanco y realizando enjuagues bucales con agua natural entre cada muestra.

Es importante mencionar que en los estudios realizados por consumidores suele existir un efecto en el orden de la presentación de las muestras (Hough, 2010). Por lo general, se tiende a dar una mejor o peor calificación a la primera muestra por ser aquella que se queda grabada más en la memoria al no haber estímulos previos (Pulido, 2008). Es por eso que el orden de presentación de las muestras es aleatorio para evitar el sesgo de orden de presentación y evitar errores posicionales (Meilgaard et al., 2016).

La escala hedónica de la hoja de evaluación fue de 9 puntos donde: 1 significa “me disgusta muchísimo”, 2 “me disgusta mucho”, 3 “Me disgusta”, 4 “Me disgusta levemente”, 5 “No me gusta ni me disgusta”, 6 “Me gusta levemente”, 7 “Me gusta”, 8 “Me gusta mucho” y 9 “me gusta muchísimo”.

El formato de evaluación que se usó se muestra en el Anexo A. Lo anterior fue llevado a cabo a través de una escala hedónica de nueve puntos en donde: 1 significa “me disgusta muchísimo”, 2 “me disgusta mucho”, 3 “Me disgusta”, 4 “Me disgusta levemente”, 5 “No me gusta ni me disgusta”, 6 “Me gusta levemente”, 7 “Me gusta”, 8 “Me gusta mucho” y 9 “me gusta muchísimo”. Además, se les preguntará la intención de compra en una escala de 5 puntos donde 1 es “Definitivamente no lo compraría”, 2 “Probablemente no lo compraría”, 3 “No sé si lo compraría o no”, 4 “Probablemente sí lo compraría” y 5 “Definitivamente sí lo compraría”. Se analizaron cada una de las respuestas de los evaluadores y se realizó una base de datos en Excel, así como gráficas de frecuencia y un análisis estadístico de los resultados (Kuskal Wallis) usando el software Minitab 18.

Una vez elegida la botana con mayor aceptación por parte de los panelistas, el sorgo y el amaranto se procesaron de forma individual bajo las mismas condiciones de extrusión y horneado que ésta, con el fin de conocer los efectos que tiene la extrusión sobre la materia prima utilizada.

Las muestras se pasaron por una malla de 0.8 mm, fueron envasadas en bolsas de polietileno selladas y puestas en refrigeración hasta los siguientes análisis.

#### 4.4 Caracterización del producto

Una vez elegida la botana con mayor aceptación por parte de los panelistas, el sorgo y el amaranto fueron sometidos de forma individual bajo las mismas condiciones de extrusión y horneado que ésta, con el fin de conocer los efectos que tiene la extrusión sobre la materia prima utilizada.

Las muestras se pasaron por malla 0.8 mm, se envasaron en bolsas de polietileno selladas y se pusieron en refrigeración hasta los siguientes análisis.

#### 4.4.1 Análisis proximal

Se realizó el análisis proximal de la botana elaborada y una botana de segunda generación comercial (churros fritos), así como para la harina de sorgo nixtamalizada, el amaranto explotado y la materia prima (sólo sorgo y amaranto) sometidos bajo el mismo proceso de extrusión y horneado que la botana siguiendo la metodología de la AOAC (2002). El porcentaje de carbohidratos se determinó por diferencia.

##### 4.4.1.1 Grasa

Se realizó por medio del método AOAC (2002), técnica 920.39 grasa cruda o extracto etéreo. Se pesaron 2 gramos de muestra en un cartucho para Soxhlet con un tapón de algodón, ambos puestos a peso constante previamente, así como los vasos para Goldfish en los que se añadió aproximadamente 100 mL de éter de petróleo. El vaso fue colocado en un soporte que se colocó debajo un condensador y se sometió a calentamiento. Se realizó la extracción por aproximadamente 3 horas. Finalmente, se evaporó el éter de petróleo en la campana de extracción y el vaso se colocó en la estufa hasta lograr un peso constante y se registró.



Figura 21. Extracción de lípidos por medio del equipo Goldfish

El porcentaje de lípidos se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Extracto etéreo} = \frac{B - A}{P.M.} \times 100$$

Donde:

B= Peso (g) del vaso con grasa

A= Peso (g) del vaso puesto a peso constante

P.M.= Peso de la muestra

#### 4.4.1.2 Proteína

La proteína total se determinó a través del método 920.105 (Kjeldhal), descrito por la AOAC (2002). Se colocaron 0.5 g de muestra en un tubo de digestión Kjeldhal, se le agregó un catalizador de sulfato de sodio y sulfato de cobre a cada tubo, y se vertieron 10 mL de ácido sulfúrico. La muestra se sometió a digestión durante aproximadamente 4 horas, hasta que el contenido tomó un color verde claro, se dejó enfriar y se colocó en un destilador, donde se le adicionó agua destilada e hidróxido de sodio al 40%. El destilado se recibió en un matraz con 25 mL de ácido bórico al 4% y como indicador se utilizó rojo de metilo y verde de bromocresol. El contenido del matraz se tituló con una solución de HCl 0.1 N (Figura 22).



Figura 22. Determinación de proteína bruta por el método de Kjeldhal

Se determinó el nitrógeno total a través de la siguiente fórmula:

Nitrógeno (%):  $(A-B) \times C \times D \times 100$

Proteína (%) = Porcentaje de nitrógeno x Factor (6.25)

Donde:

A= ml de solución gastados en la muestra problema

B= ml de solución gastados del blanco

C= meq N<sub>2</sub> 0.014

D= Normalidad del ácido

M= Peso de la muestra

#### 4.4.1.3 Humedad

Se determinó por la técnica 925.23 del AOAC (2002). Se pesaron 3 g de muestra en una capsula o charola puesta a peso constante previamente, se colocaron en la estufa a 135°C por aproximadamente 3 horas, después se colocaron en un desecador hasta llegar a temperatura ambiente y se pesaron en una balanza analítica.



Figura 23. Determinación de humedad de las muestras

El porcentaje de humedad se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$\%humedad = \frac{Mh - Ms}{Mo} \times 100$$

Donde Mh= peso del crisol con muestra húmeda, Ms= peso del crisol con muestra seca y Mo= Peso de la muestra húmeda.

#### 4.4.1.4 Cenizas

Se realizó la metodología descrita por AOAC (2002), técnica 945.46, se pesaron 3 g de muestra en un crisol de porcelana puesto a peso constante previamente, las muestras se calcinaron por aproximadamente 5 horas aproximadamente en una

mufla a 550-560 °C, posteriormente se colocaron en un desecador hasta que llegue a la temperatura ambiente y se pesaron en una balanza analítica.



Figura 24. Determinación del porcentaje de cenizas en las muestras

Se calculó el porcentaje de cenizas a través de la siguiente fórmula:

$$\%cenizas = \frac{\text{Peso de las cenizas}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

#### 4.4.1.5 Fibra dietética

##### 4.4.1.5.1 Cuantificación de fibra insoluble

La extracción de fibra insoluble se llevó a cabo por el método oficial AOAC 991.43 en donde por cada gramo de muestra se adicionó 50 ml de buffer de fosfato 0.08 mM a pH 6, el pH se ajustó con NaOH 0.3 N. Enseguida se adicionó 0.1 mL de alfa-amilasa. El frasco tapado y protegido de la luz se incubó a baño María a 95 °C por 30 min, agitando cada 5 min., después se ajustó el pH a 7.5 con NaOH 0.3 N. Posteriormente se adicionó 0.1 mL de proteasa (5 mg/ml) y se incubó a 60°C por 30 minutos con agitación continua, se ajustó el pH a 4.5 con HCl 0.4 N. Se adicionó 300 µL de amiloglucosidasa y se incubó nuevamente a baño María por 30 minutos a 60°C con agitación continua.

La muestra se filtró con papel Whatman No. 4 realizando dos lavados con agua a 60°C utilizando 10 mL de agua por lavado, así como dos lavados con 10 mL de etanol al 80% y dos lavados de acetona (Figura 25). El filtro se puso a peso constante a 60°C por 24 horas y se pesó.



Figura 25. Filtración para la determinación de fibra.

$$\%Fibra\ insoluble = \frac{(Peso\ filtro\ final) - (Peso\ filtro\ inicial)}{Peso\ de\ la\ muestra} \times 100$$

#### 4.4.1.5.1 Cuantificación de fibra soluble

Al residuo del filtrado del análisis de fibra insoluble, se le adicionó un volumen igual de etanol al 80% y se dejó reposar en refrigeración (4 °C) por 48 h. Pasado este lapso, se filtró en papel filtro Whatman No. 4, haciendo dos lavados con 10 ml de etanol al 80% y otros dos con 10 ml de acetona. El filtro se dejó secar por 24 h en estufa a 60 °C, después de lo cual se registró el peso.

$$\%Fibra\ soluble = \frac{(Peso\ filtro + muestra) - Peso\ filtro}{Peso\ de\ muestra} \times 100$$

#### 4.4.1.6 Carbohidratos

El porcentaje de carbohidratos se calculó por diferencia, se sumaron los porcentajes de los análisis proximales realizados y se le restó al 100%. Esta diferencia corresponde a los carbohidratos totales de la muestra.

$$\text{Carbohidratos totales (\%)} = 100 - (G + P + H + C)$$



Dónde: P = % de proteína de la muestra, G = % de grasa de la muestra, H = % de humedad de la muestra, C= % de cenizas de la muestra

#### 4.4.2 Caracterización física

##### 4.4.2.1 Textura

Para la determinación de la fuerza máxima se empleó un texturómetro (Texture Analyzer modelo TA Plus., Loyd Instrument AMETEK Inc., England) con una sonda cilíndrica de punta aguda (Rodríguez-Vidal, 2017), mediante el software Nexygen plus (Figura 26)

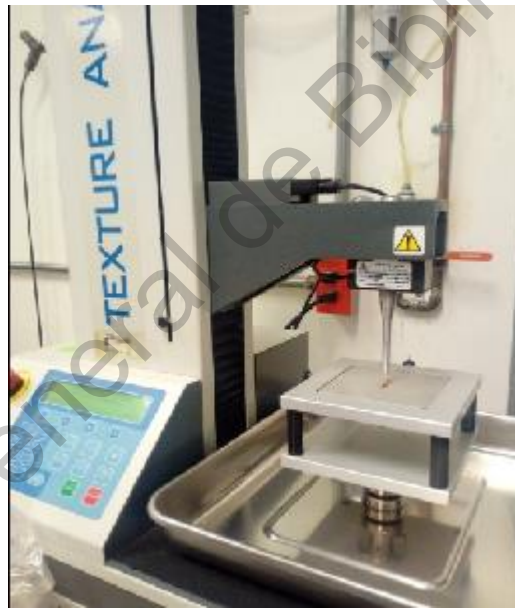


Figura 26. Medición de textura a través del analizador de textura

La muestra de botana de 3 cm de largo fue colocada en la plataforma del equipo y se utilizó una fuerza de 0.5 N, una velocidad de descenso de 5 mm/s y 3 mm de distancia de penetración.

##### 4.4.2.2 Color

La determinación del color se llevó a cabo en cada una de las muestras presentadas en la evaluación sensorial, así como a la materia prima sometida bajo las condiciones



de la botana preferida por los panelistas. Esta medición se hizo por triplicado utilizando un colorímetro Kónika Minolta modelo CR-400 (Figura 27). La lectura se reportó en el espacio de colores L, a y b.



Figura 27. Colorímetro Konica Minolta CR-400

Para determinar la diferencia de color entre las tres coordenadas del churro a base de sorgo y amaranto y el comercial se utilizó la siguiente fórmula:

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

#### 4.4.3 Caracterización nutraceutica

##### 4.4.3.1 Compuestos fenólicos

##### 4.4.3.1.1 Extracción de fenoles libres y ligados

Para la extracción de fenoles libres y ligados se siguió la metodología descrita por Aguayo-Rojas y col., 2012. Se adicionó 10 mL de una mezcla de metanol-agua (80:20, v/v) a 0.5 g de harina desengrasada (sorgo, amaranto, sorgo extruido, amaranto extruido, churro comercial y elaborado) y se agitó en un plato magnético por 10 minutos a 50 rpm. La solución se centrifugó a 3000 x g durante 10 minutos y se recuperó el sobrenadante el cual fue almacenado a -20°C protegido de la luz hasta su posterior uso.

Para obtener el extracto de fenoles ligados, la pastilla obtenida por centrifugación se resuspendió en 20 mL de NaOH 2M y se le inyectó Nitrógeno gaseoso para desplazar

el aire presente en el espacio de cabeza antes de realizar la digestión. Posteriormente las muestras se hidrolizaron a 95°C/30 minutos y 25°C/ 60 minutos en un plato de agitación magnético. Se neutralizó el NaOH con HCl y la solución obtenida se lavó 5 veces con 10 mL de acetato de etilo, aspirando cuidadosamente la fase superior y transfiriéndola a un tubo nuevo en cada ocasión. Finalmente, los extractos se rotaevaporaron hasta sequedad a 45°C (Figura 28) y se resuspendieron con 2 mL de metanol. Las muestras se almacenaron en viales protegidos de la luz a -20°C hasta su uso posterior.



Figura 28. Rotaevaporación de los extractos para obtención de fenoles ligados

#### 4.4.3.1.2 Determinación de fenoles totales

El contenido fenólico total de los extractos (libres y ligados) se determinó según el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu indicado por Singleton y Rossi, 1965. Para la preparación de la muestra se mezclaron 50  $\mu\text{L}$  del extracto con 250  $\mu\text{L}$  de agua destilada y 125  $\mu\text{L}$  de reactivo Folin-Ciocalteu 1N, se sonicó durante 5 min, posteriormente se añadieron 625  $\mu\text{L}$  de una solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 7% y se incubó durante 2 h en la oscuridad. El blanco se preparó mezclando todo lo anterior, sólo reemplazando el contenido del extracto por metanol. La absorbancia se leyó a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de ácido gálico/g de muestra (mg GAE / g) mediante una curva de calibración (Figura 29).

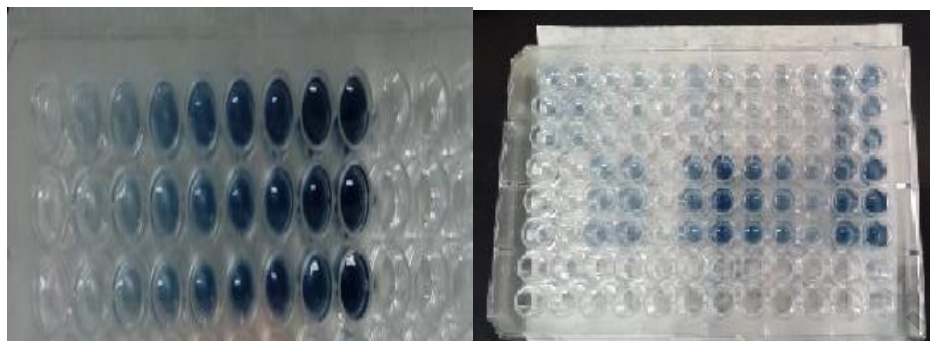


Figura 29. Microplaca de la curva de calibración de fenoles totales y muestras

#### 4.4.3.1.3 Flavonoides totales

La cuantificación de flavonoides se llevó a cabo siguiendo la metodología de Oomah y col., 2005. Se colocaron 50  $\mu\text{L}$  del extracto metanólico con 180  $\mu\text{L}$  de agua destilada y 20  $\mu\text{L}$  de la solución de 2-aminoetildifenilborato al 1% de metanol. La lectura se realizó en un espectrofotómetro (Multiskan ASCENT ThermoLab Systems, versión 1.3.1) a 404 nm. Se calculó la concentración con una curva estándar (Figura 30) y el contenido de flavonoides se expresó como mg equivalentes de rutina por gramo de muestra.

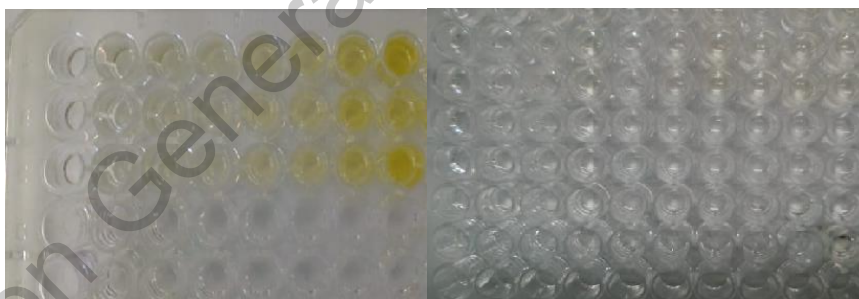


Figura 30. Microplaca de la curva de calibración de flavonoides y muestras

#### 4.4.3.1.4 Determinación de taninos condensados

La cuantificación de taninos condensados se realizó a través del método de la vainillina (Deshpande, y Cheyran, 1987). Se tomaron 50  $\mu\text{L}$  del extracto y se adicionaron 200  $\mu\text{L}$  de reactivo de vainillina 0.5% (vainillina 1% en metanol y HCl 8% en metanol en una relación 1:1) y se colocaron en una placa de 96 pocillos. Para la preparación del blanco se adicionó 50  $\mu\text{L}$  de metanol y 200  $\mu\text{L}$  de HCl al 4%. Los

taninos condensados se cuantificaron a 492 nm en un lector de microplacas (Multiskan ASCENT ThermoLab Systems, versión 1.3.1). Cada muestra se analizó por triplicado y los resultados se obtuvieron mediante la curva de calibración de (+)-catequina equivalente (Figura 31). Los resultados se expresaron como mg (+)-catequina equivalente/g de muestra.



Figura 31. Microplaca de la curva de calibración de taninos condensados y muestras

#### 4.4.3.1.5 Capacidad antioxidante DPPH

La determinación se llevó a cabo de acuerdo a lo descrito por Fukomoto y Mazza, 2000, adaptado a microplaca. Para la solución control se añadieron a la microplaca 20  $\mu$ L de metanol con 200  $\mu$ L de la solución DPPH. Las muestras se prepararon por triplicado y se leyeron cada 10 minutos a una longitud de onda de 540 nm. La actividad antiradical o antioxidante fue calculada como el porcentaje de decoloración DPPH (Chávez y col., 2017):

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{\text{Absorbancia control} - \text{Absorbancia muestra}}{\text{Absorbancia del control}} \times 100$$

Los valores de las muestras se obtuvieron a través de una curva de calibración de trolox (Figura 32) y los resultados se expresaron en  $\mu$ mol equivalentes de trolox/g de muestra.

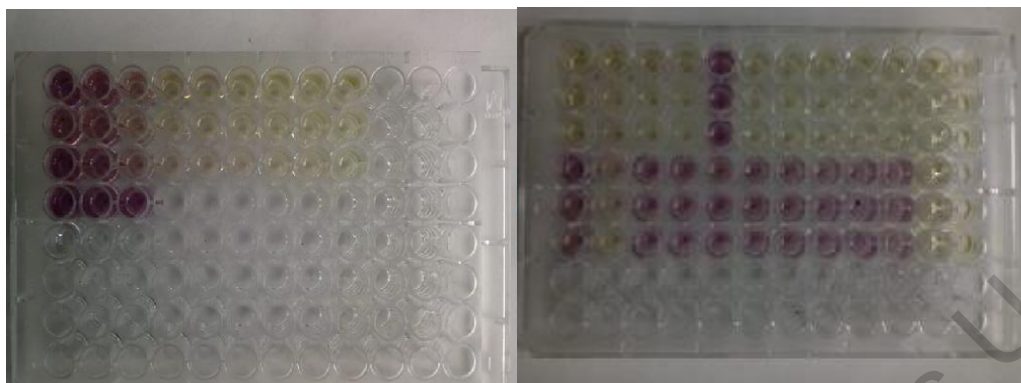


Figura 32. Microplaca de la curva de calibración de DPPH y muestras

#### 4.4.3.1.6 Capacidad antioxidante ABTS

La actividad antirradical se realizó por el método ABTS 2,2-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico descrito por Nenadis y col., 2004. Se preparó una solución acuosa 7 mM de ABTS y 140 mM de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se mezclarán con 5 mL de la solución ABTS y 88 µL de la solución de persulfato de potasio. Se cuidó de no exponerlo a la luz durante 12 horas con el fin de que se lleve a cabo la generación del radical. Posteriormente, se realizó una dilución mezclando 500 µL de la solución y 20-25 mL de etanol y se leyó en un espectrofotómetro (Multiskan ASCENT ThermoLab Systems, versión 1.3.1) a una longitud de onda de 734 nm.

El porcentaje de inhibición se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula (Chávez y col., 2017):

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{\text{Absorbancia control} - \text{Absorbancia muestra}}{\text{Absorbancia del control}} \times 100$$

Los valores de las muestras se determinaron a través de la curva de calibración (Figura 33) y los resultados de capacidad antioxidante se expresará como µmol equivalentes de Trolox / g de muestra.

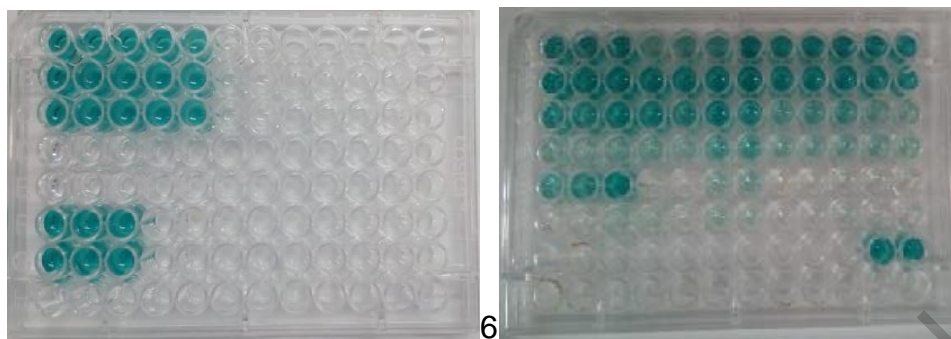


Figura 33. Microplaca de la curva de calibración de ABTS y muestras

#### 4.4.3.2 Almidón resistente

En cada una de las muestras (amaranto, amaranto extruido, sorgo, sorgo extruido, botana elaborada y comerci) se llevó a cabo la metodología especificada en por la AOAC método 2002.02 con ayuda del kit Megazyme Resistant starch K-RSTAR (Ireland, 2015).

Se pesaron 100 mg de muestra en un tubo eppendorf y se le adicionó 4 mL de la enzima  $\alpha$ -amilasa pancreática (10 mg/mL) contenida en una solución de amiloglucosidasa (AMG) de 3 U/mL por triplicado. Los tubos se taparon y se incubaron en agitación a 200 rpm a 37°C durante 16 h. Posteriormente se colocaron 4 mL de etanol (99% v/v) y se agitaron en un vórtex. Los tubos se agitaron a 3000 rpm por 10 minutos. Después se decantó cuidadosamente los sobrenadantes y los pellets se re-suspendieron en 2 mL de etanol 50% y se agitaron en un vórtex. Se añadieron cerca de 6 mL de etanol 50%, se mezclaron y se centrifugaron nuevamente a 3000 rpm por 10 minutos. De decantaron los sobrenadantes y se repitió el proceso.

Se añadió una barra magnética y 2 mL de KOH 2M en cada tubo y se re-suspendieron los pellets, agitándolo por 20 minutos en un baño de hielo con un agitador magnético. Se añadieron 8 mL de buffer acetato de sodio (pH=3.8) en cada tubo y se agitó. Inmediatamente 0.1 mL de la solución AMG 3300 U/mL se mezcló bien, se colocaron en un baño de agua a 50°C y se incubaron con agitación



intermitente durante 30 minutos. Los tubos se centrifugaron a 3000 rpm por 10 minutos. Se transfirieron 0.1 mL del sobrenadante a un tubo y se añadieron 3 mL del reactivo glucosa oxidasa / peroxidasa (GOPOD) y se incubaron a 50°C por 20 minutos. Posteriormente las muestras se pasaron a una microplaca (Figura 34) donde se midió la absorbancia de cada solución a 510 nm contra el blanco (0.1 mL de buffer acetato de sodio 100 mM pH 4.5 y 3 mL del reactivo de GOPOD).

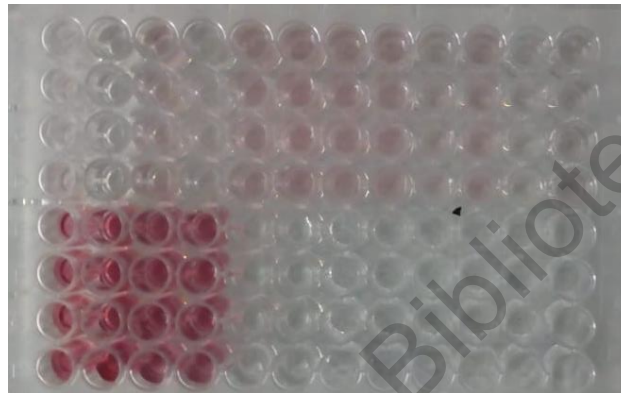


Figura 34. Microplaca de almidón resistente

La cantidad de almidón resistente (g/100 g de muestra) se calculó a través de la siguiente fórmula utilizando el programa Mega-Calc™:

$$\text{Almidón resistente} = \Delta E \times F \times 10.3/0.1 \times 1/1000 \times 100/W \times 162/180 = \Delta E \times F/W \times 9.27$$

Dónde:

$\Delta E$  = Absorbancia (reacción) leída contra el blanco.

F = Conversión a partir de la absorbancia a microgramos (absorbancia obtenida por 100  $\mu\text{g}$  de D-glucosa en a reacción de GOPOD es determinada y F=100 ( $\mu\text{g}$  de D-glucosa) dividida entre la absorbancia GOPOD por estos 100  $\mu\text{g}$  de D-glucosa

100/0.1 = Corrección del volumen (0.1 tomados de 100 mL).

1/1000 = Conversión de microgramos a miligramos.

W = Peso seco de la muestra analizada= Peso x [(100-contenido de humedad) /100]

100/W = Factor que representa el almidón resistente como el porcentaje del peso de la muestra.

$162/180$  = Factor para convertir de D-glucosa libre, según se determine, a anhidro-D-glucosa como ocurre en el almidón

$10.3/0.1$  = corrección de volumen (0,1 ml tomada de 10,3 ml) para muestras que contienen 0-10% de almidón resistente donde la solución de incubación no se diluye y el volumen final es de ~ 10.3 ml.

#### 4.5 Análisis estadístico

Cada uno de los datos obtenidos después de la caracterización se expresó como la media de tres experimentos independientes  $\pm$  desviación estándar y se analizaron por ANOVA empleando comparación de medias de Tukey ( $p < 0.05$ ). La selección de los mejores tratamientos se analizó a través de un diseño factorial ( $p < 0.05$ ). El resultado de la prueba sensorial se expresó mediante la mediana (valor del promedio) y se analizaron a través de la prueba de Kruskal Wallis ( $p > 0.05$ ). Para este análisis se utilizó el programa estadístico Minitab 18.

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 Caracterización del grano de sorgo

De acuerdo a la NMX-FF-037-1994, el porcentaje de humedad máximo para el grano de sorgo debe ser del 14%. Como se muestra en el Cuadro 16, la materia prima utilizada presentó un porcentaje de  $8.48 \pm 0.133$  % por lo tanto, este parámetro se encuentra dentro del límite de dicha norma. Bajo algunos criterios de clasificación descritos en la norma anteriormente mencionada, el grano de sorgo se puede considerar como de tipo 1 ya que el peso hectolítrico calculado fue de  $75.46 \pm 0.22$  %. Por otro lado, el porcentaje de impurezas obtenido fue casi el doble ( $9.4 \pm 0.69$  %) a lo reportado por la norma (4.5%) anteriormente mencionada. Sin embargo, el sorgo se tamizó y se limpió antes de ser procesado.



Cuadro 16. Caracterización física del grano de sorgo

Parámetro	Valor obtenido
Humedad (%)	8.48 ± 0.13
Peso hectolítrico (kg/hL)	75.46 ± 0.22
Impurezas (%)	9.4 ± 0.69
Dimensiones (mm)	3 x 2.5 x 1.5

## 5.2 Preparación de la materia prima

### 5.2.1 Obtención de harina de sorgo nixtamalizado

En el Cuadro 17 se muestran los valores de peso y rendimiento en la obtención de la harina de sorgo. Se puede observar que se pierde un 16.35% del peso al secar los granos de sorgo una vez nixtamalizado, por lo que al producir la harina se obtiene el 80.73% de la materia prima inicial.

Cuadro 17. Rendimientos del procesamiento del sorgo

Parte del proceso	Peso (kg)	Porcentaje de rendimiento
Grano de sorgo sin nixtamalizar	4.100	100%
Sorgo nixtamalizado seco	3.430	83.65%
Harina de sorgo obtenida	3.310	80.73%

### 5.2.2 Caracterización física del sorgo nixtamalizado

Durante el proceso de nixtamalización, la adición de calcio y el posterior lavado de los granos provoca un aumento de la alcalinidad de la mezcla, lo cual se refleja en el pH del nejayote el cual presentó un valor de  $10.75 \pm 0.03$ . Además, se observó un porcentaje de sólidos de  $5.01 \pm 0.196$  en éste, lo cual se debe a la remoción del pericarpio durante la cocción alcalina (Cuadro 18).

Cuadro 18. Caracterización del nejayote del sorgo

Parámetro	Valor
pH Nejayote	10.75 ± 0.03
Porcentaje de sólidos nejayote	5.01 ± 0.196

Es importante mencionar que en base a estudios anteriores reportados por Gutiérrez y col., (2016), se sometió el sorgo a cocción sin adición de hidróxido de calcio y en presencia de éste, observando que el proceso de nixtamalización tiene un efecto directo sobre la modificación de la estructura, color, viscosidad y composición final de calcio. Esto se puede deber al efecto que tiene el calcio sobre el pericarpio. Cuando se aumenta el tiempo de reposo, el calcio tiene mayor tiempo para difundir hacia el interior del grano, provocando cambios de color, cambios en el contenido de este mineral y en las propiedades fisicoquímicas.

### 5.3 Optimización de la formulación del extruido de amaranto explotado y sorgo nixtamalizado

En el Cuadro 19 se describen las propiedades de la masa y del producto final obtenidos en cada uno de los diseños realizados.

Cuadro 19. Propiedades de la masa y del producto terminado en cada una de las pruebas de optimización

Prueba	Observaciones
1	Se debe disolver el emulsificante en caliente de manera que se distribuya uniformemente en toda la masa. La masa adquiere una coloración dorada. Textura de los churros más suave al usar un porcentaje de emulsificante de 0.2 %
2	Al someter la masa a una temperatura de 120°C no se logró obtener un producto pre-cocido con una consistencia firme y uniforme por lo que a pesar de que el producto final presentó una menor fuerza máxima tecnológicamente era difícil de manipular y procesar.
3	La masa que emplea amaranto tamizado por malla 60 presenta una mayor viscosidad y dificultad para ser extruida, además de que posterior a ser horneada, esta presenta una mayor dureza. La masa que contiene una mayor proporción de agua es más moldeable y el producto final presenta una menor dureza.
4	El producto extruido de la masa a la que no se le espolvoreó chile externamente, presenta un mayor agrado en cuando a vista y sabor ya que el otro al momento de salir del horneado presenta manchas oscuras en menor tiempo y es menos agradable sensorialmente.
5	La masa con el agente leudante presenta un aumento en su volumen al momento de salir del proceso de extrusión además de que el producto final presenta una mayor crujencia en comparación con la masa sin agente leudante

Una vez realizadas las pruebas preliminares, se realizó la optimización del producto como se describe a continuación.

Las propiedades del producto (textura, estructura, expansión y atributos sensoriales) se ven influenciadas por los parámetros utilizados durante la extrusión. Algunos de éstos son: la temperatura empleada, el tipo y la velocidad del tornillo, así como la formulación de la materia prima en la que es importante destacar el contenido de

humedad, proteínas, almidón y lípidos, así como los aditivos usados (Lobato y col., 2011).

La textura de los alimentos extruidos es el resultado de su microestructura, que como se mencionó anteriormente, depende de la influencia de las fuerzas físicas y los componentes químicos (Lobato y col., 2011). La dureza de un producto es definida como la fuerza máxima obtenida durante la compresión. Un valor alto de dureza no es un atributo deseable para botanas extruidas (Yanniotis y col., 2007), es por eso que se decidió evaluar este parámetro como respuesta para elegir la mejor formulación del producto a través de una serie de diseños experimentales (Cuadro 14). Es importante mencionar que cada tratamiento se llevó cabo de manera aleatorizada e independiente.

En el Cuadro 20 se presenta la fuerza máxima obtenida de las muestras con 0.1 y 0.2% de monoesterato de glicerilo y a un tiempo de horneado de 30 y 40 minutos respectivamente.

Cuadro 20. Resultados de la evaluación de la dureza de los tratamientos de la primera prueba preliminar realizada

Tiempo de horneado (min)	Porcentaje de emulsificante	Fuerza máxima (N)
40	0.1	15.70 ± 2.78 <sup>a</sup>
40	0.2	9.91 ± 0.55 <sup>b</sup>
30	0.1	11.15 ± 0.79 <sup>b</sup>
30	0.2	12.75 ± 0.79 <sup>ab</sup>

Los resultados representan media ± desviación estándar de tres mediciones. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa en la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis estadístico, el tiempo de horneado por sí solo no afecta directamente en la dureza del producto en los niveles evaluados, sin embargo, en la Figura 35 se puede observar que existe una interacción entre éste

y el porcentaje de emulsificante. La menor dureza se obtuvo al utilizar 0.2% de monoesterato y 40 minutos de horneado ( $9.91 \pm 0.55$  N). En base a estos resultados, se decidió emplear un porcentaje de emulsificante de 0.2% para los análisis posteriores. Durante la cocción por extrusión el emulsificante forma complejos con la amilosa del almidón proporcionando una capa protectora en la superficie de estos gránulos mejorando la textura, adhesividad del extruido y la capacidad de retención de gas (Ilo y col., 2000; Botella y col., 2004).

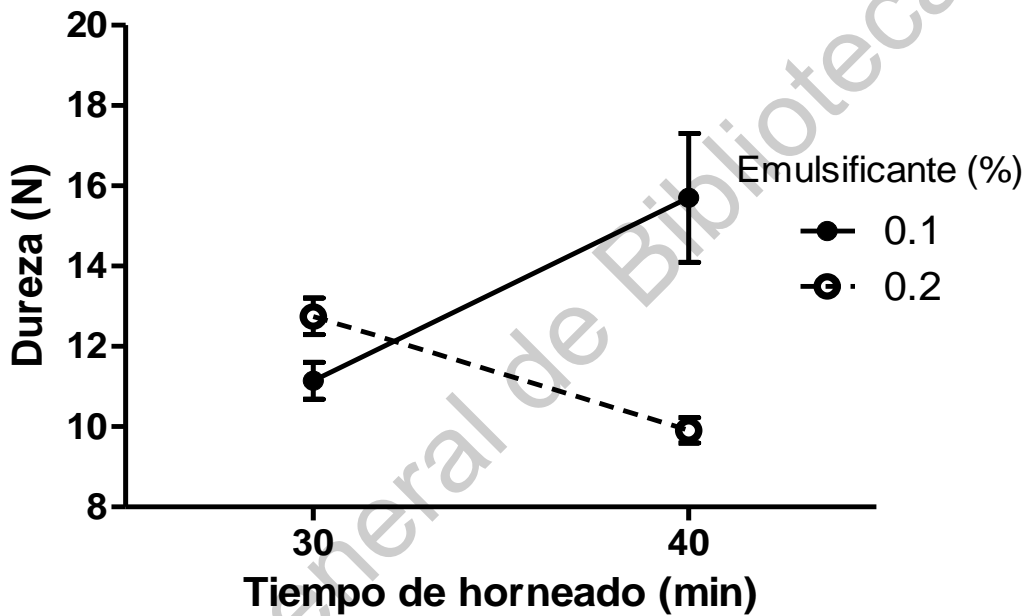


Figura 35. Efecto de la interacción del emulsificante y tiempo de horneado sobre la dureza de la botana

En la segunda prueba preliminar se evaluó el efecto del porcentaje de sorgo y la temperatura de extrusión en la dureza del producto. En el Cuadro 21 se presenta la dureza obtenida de las formulaciones de 60 y 70% de sorgo, sometidas a una temperatura de extrusión de 110-110 °C y 110-120°C respectivamente.

Cuadro 21. Resultado de la dureza de los tratamientos de la segunda prueba preliminar realizada

Sorgo (%)	Temperatura de la segunda zona del extrusor (°C)	Fuerza máxima (N)
70	110	31.14 ± 3.18 <sup>a</sup>
70	120	26.39 ± 1.39 <sup>b</sup>
60	110	15.98 ± 0.20 <sup>c</sup>
60	120	10.32 ± 1.00 <sup>d</sup>

Los resultados representan media ± desviación estándar de tres mediciones. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa en la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

En el Cuadro 21 también se puede observar que, al aumentar el porcentaje de sorgo en la formulación, se incrementa la dureza del producto extruido. Esto puede deberse al alto contenido de almidón y de fibra presente en el sorgo (Adedeji y col., 2016) ya que se ha reportado que estos compuestos contribuyen significativamente a la dureza de los extruidos. La fibra insoluble puede causar la disminución del contenido de humedad del producto, el engrosamiento de sus paredes celulares y la disminución de la porosidad de la matriz provocando la reducción del tamaño de las células de aire presentes y en algunos casos su rompimiento, por lo que no sólo la dureza se ve afectada sino también el índice de expansión del producto (Yanniotis y col., 2007). Por otro lado, formulaciones con alto contenido de proteína, como es el caso del amaranto, muestran un incremento en la adhesividad y gomosidad de los extruidos (Adedeji y col., 2016).

Es importante mencionar que a menor temperatura la dureza fue mayor. La temperatura elevada del extrusor hace que el almidón se gelatinice y forme una masa fundida viscosa y plastificada la cual forma burbujas de vapor de agua en las paredes, lo que puede conferirle una menor dureza. Cuando el material sale del dado del extrusor, la caída repentina de la presión hace que estas burbujas se expandan rápidamente, pierdan humedad por evaporación y se enfríen simultáneamente. Estos cambios causan un rápido aumento en la viscosidad del material. Al enfriarse pasa a

estado vítreo que proporciona la estructura y la estabiliza (Figura 36) (Fellows, 2017). Se ha comprobado que los valores de elasticidad de los extruidos cuando se encuentran en estado vítreo son similares, independientemente de su proporción amilosa-amilopectina, pero al pasar al estado gomoso esta flexibilidad tiende a disminuir, principalmente si se tiene un gran contenido de amilosa ya que gracias a ésta se presentaría una mayor facilidad de enredarse restringiendo su movilidad, mientras que si el material presenta moléculas de amilopectina altamente ramificada, permite adoptar una conformación más compacta y flexible (Ramos-Díaz, 2015),

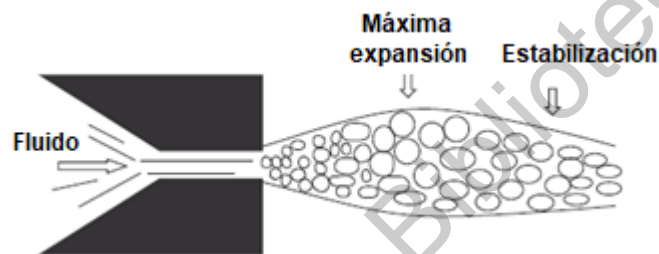


Figura 36. Expansión del extruido en el dado del extrusión, formación y crecimiento de las burbujas y estabilización (Fellows, 2017)

Por otro lado, en la Figura 37 se puede apreciar que no existe interacción entre el porcentaje de sorgo y la temperatura de extrusión empleada en la botana. Además, se puede observar que, al aumentar el porcentaje de sorgo en la formulación, se incrementa la dureza del producto extruido. Esto puede deberse al alto contenido de almidón y de fibra presente en el sorgo (Adedeji y col., 2016) ya que se ha reportado que estos compuestos contribuyen significativamente a la dureza de los extruidos. La fibra insoluble puede causar la disminución del contenido de humedad del producto, el engrosamiento de sus paredes celulares y la disminución de la porosidad de la matriz provocando la reducción del tamaño de las células de aire presentes y en algunos casos su rompimiento, por lo que no sólo la dureza se ve afectada sino también el índice de expansión del producto (Yanniotis y col., 2007). Por otro lado, formulaciones con alto contenido de proteína, como es el caso del amaranto, muestran un incremento en la adhesividad y gomosidad de los extruidos (Adedeji y

col., 2016). Por lo tanto, menores valores de dureza se obtuvieron con la relación de 60% sorgo y 40% amaranto explotado.

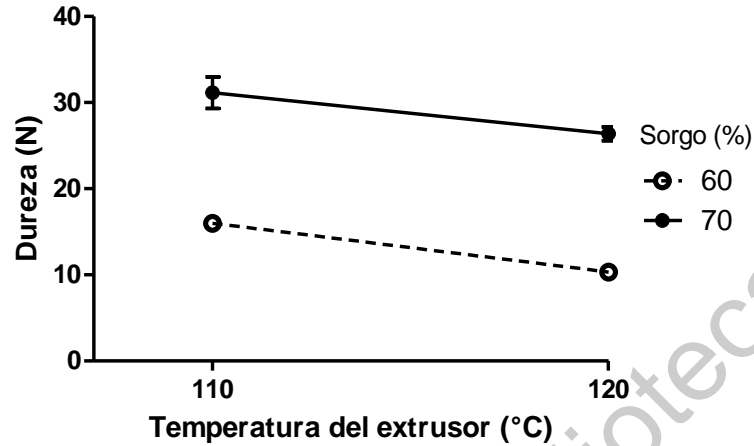


Figura 37. Interacción del porcentaje de sorgo y temperatura del extrusor

Es importante mencionar que, a pesar de que el estadístico indica que se obtiene una menor dureza al usar una temperatura de 120°C y 60% de sorgo ( $10.32 \pm 1.00$  N), tecnológicamente esto no es viable ya que las masas extruidas a 120°C no tienen una buena consistencia lo que dificulta su procesamiento (Figura 38). Basados en los resultados de las evaluaciones preliminares, se decidió utilizar una temperatura de extrusión de 110-110°C y una relación de 60% sorgo 40% amaranto en análisis posteriores.



Figura 38. Masa extruida a una temperatura de 110-120°C



En la tercera prueba preliminar, se llevó a cabo un diseño 3x2x2, con la finalidad de evaluar el efecto de la molienda del amaranto (entero y pasado por malla 60), la proporción de agua (60 y 85%) y el tiempo de horneado (30, 40 y 50 min) sobre los valores de dureza de la botana. En el Cuadro 22 se puede apreciar que el menor valor de dureza se obtiene a un tiempo de horneado de 40 minutos, utilizando amaranto molido y tamizado por malla 60 y un porcentaje de agua de 85% en la formulación. Mientras que la mayor dureza fue conferida por los valores máximos de las tres variables

Cuadro 22. Dureza de los tratamientos de la tercera prueba preliminar realizada

Molienda del amaranto	Tiempo de horneado (min)	Agua (%)	Dureza (N)
Entero	30	60	12.49 ± 0.83 <sup>ab</sup>
Entero	30	85	9.72 ± 0.72 <sup>c</sup>
Entero	40	60	10.18 ± 0.71 <sup>c</sup>
Entero	40	85	4.66 ± 0.12 <sup>e</sup>
Entero	50	60	10.49 ± 0.89 <sup>bc</sup>
Entero	50	85	7.25 ± 0.59 <sup>d</sup>
Molido	30	60	10.25 ± 1.95 <sup>c</sup>
Molido	30	85	13.02 ± 0.87 <sup>a</sup>
Molido	40	60	9.05 ± 0.45 <sup>cd</sup>
Molido	40	85	10.59 ± 0.33 <sup>bc</sup>
Molido	50	60	8.79 ± 0.65 <sup>cd</sup>
Molido	50	85	13.45 ± 0.48 <sup>a</sup>

Los resultados representan media ± desviación estándar de cuatro mediciones. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa en la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

En la Figura 39 C, se observa que la dureza disminuye al utilizar amaranto explotado sin proceso de molienda, 40 minutos de horneado y 85% de agua ( $4.66 \pm 0.12$  N). Sin embargo, vuelve a aumentar cuando el tiempo de horneado es de 50 minutos ( $7.25 \pm 0.59$  N). Debido a esto, en el siguiente diseño se decidió añadir otro valor de humedad (1:1) y tiempo de horneado (60 min), además de evaluar el efecto que se tendría el adicionar una mezcla de chile en polvo. El análisis estadístico (Figura 39 B) mostró que el porcentaje de agua y el tamaño de partícula tuvieron un efecto de interacción inversamente proporcional sobre la dureza del producto.

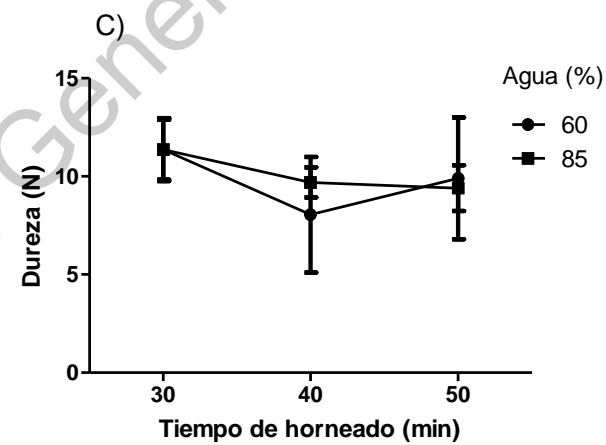
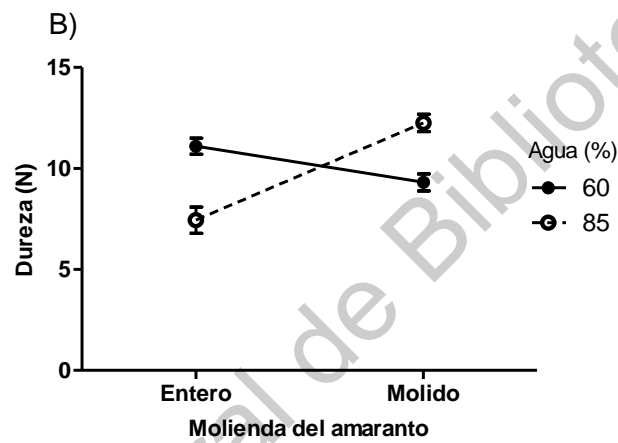
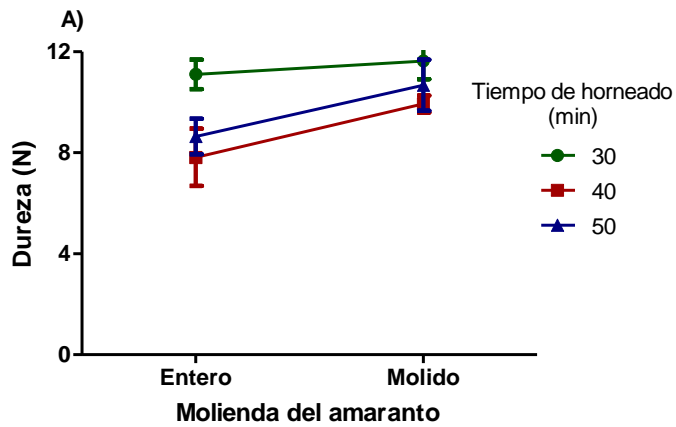


Figura 39. Gráfica de interacción del porcentaje de agua, tiempo de horneado y molienda del amaranto.

En la cuarta prueba preliminar, se llevó a cabo un diseño 2x2x3x4 en donde se evaluó el efecto de la molienda del amaranto (entero y pasado por malla 60), la proporción de agua, el tiempo de horneado, así como el efecto de adicionar chile espolvoreado al producto final, tal como se describió en la sección 4.3.3 (Cuadro 14).

En la Figura 40 se muestran los valores de dureza para las formulaciones preliminares. Las mezclas con 60 y 85% de agua no mostraron diferencias en este parámetro independientemente del tiempo de horneado empleado, presentando los valores más altos de dureza. Sin embargo, al utilizar una relación de harina-agua 1:1 la dureza fue menor utilizando tiempos de horneado de 30 a 50 minutos, mientras que, con un horneado de 60 minutos, no hubo diferencia en dureza con los otros porcentajes de agua utilizados. Se observó también que el uso del grano entero (Figura 40 B) y la adición de chile (Figura 40 C) produjeron botanas con menor dureza independientemente del tiempo de horneado. Por otra parte, se evaluó también el efecto de relación de agua usada con el tamaño de partícula, observándose que el amaranto entero y una mayor proporción de agua disminuyeron la dureza de la botana significativamente (Figura 40 D). En la Figura 40 E, se observa que los menores valores de dureza se presentaron en las formulaciones que tienen chile espolvoreado los cuales disminuyen conforme se incrementa la humedad. Por otro lado, al no adicionar chile, el valor de dureza se mantiene constante al emplear 60 y 85% de agua en la formulación, pero al emplear una relación 1:1 ésta disminuye considerablemente siendo aún menor que las formulaciones a las que se les espolvoreó el chile. No se observó efecto del tamaño de la partícula al agregar chile espolvoreado, el valor de dureza se mantiene constante sin importar la molienda del amaranto (Figura 40 F). Por otro lado, cuando no se utiliza chile, existe un incremento en la dureza al utilizar amaranto molido.

En términos generales, se observó un efecto de interacción sólo entre la adición de chile y las variables “porcentaje de agua” y “tamaño de partícula del amaranto” (Figuras 40 E y F, respectivamente).

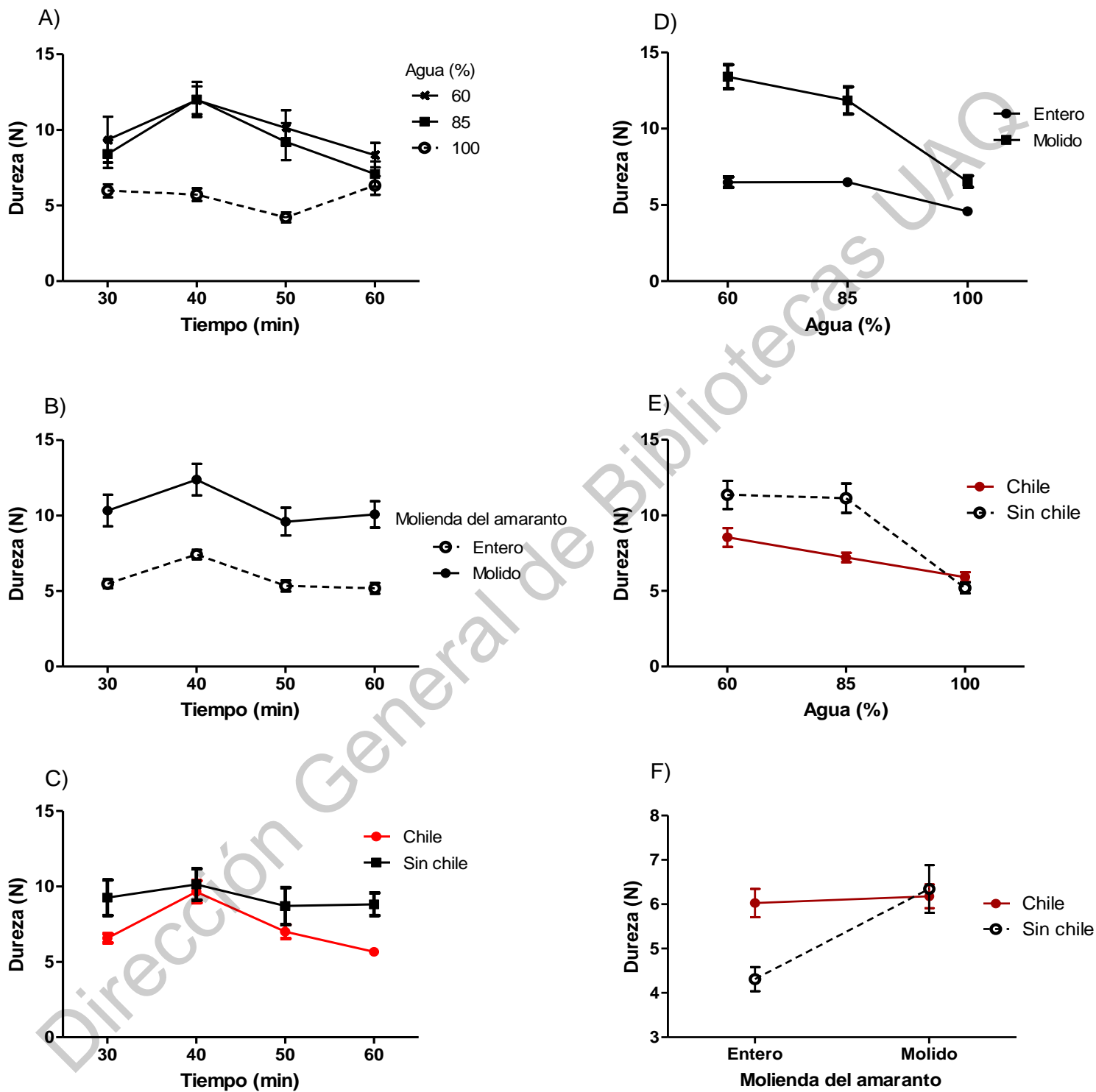


Figura 40. Efecto de la proporción de agua, chile espolvoreado, molienda del amaranto y temperatura de horneado sobre la dureza del producto.

Lo anterior se puede apreciar mejor en la Figura 41, donde se muestran los efectos del porcentaje de agua, adición de chile espolvoreado y el tiempo de horneado en la dureza del producto. Se puede observar que los menores valores de dureza se presentaron al utilizar amaranto entero.

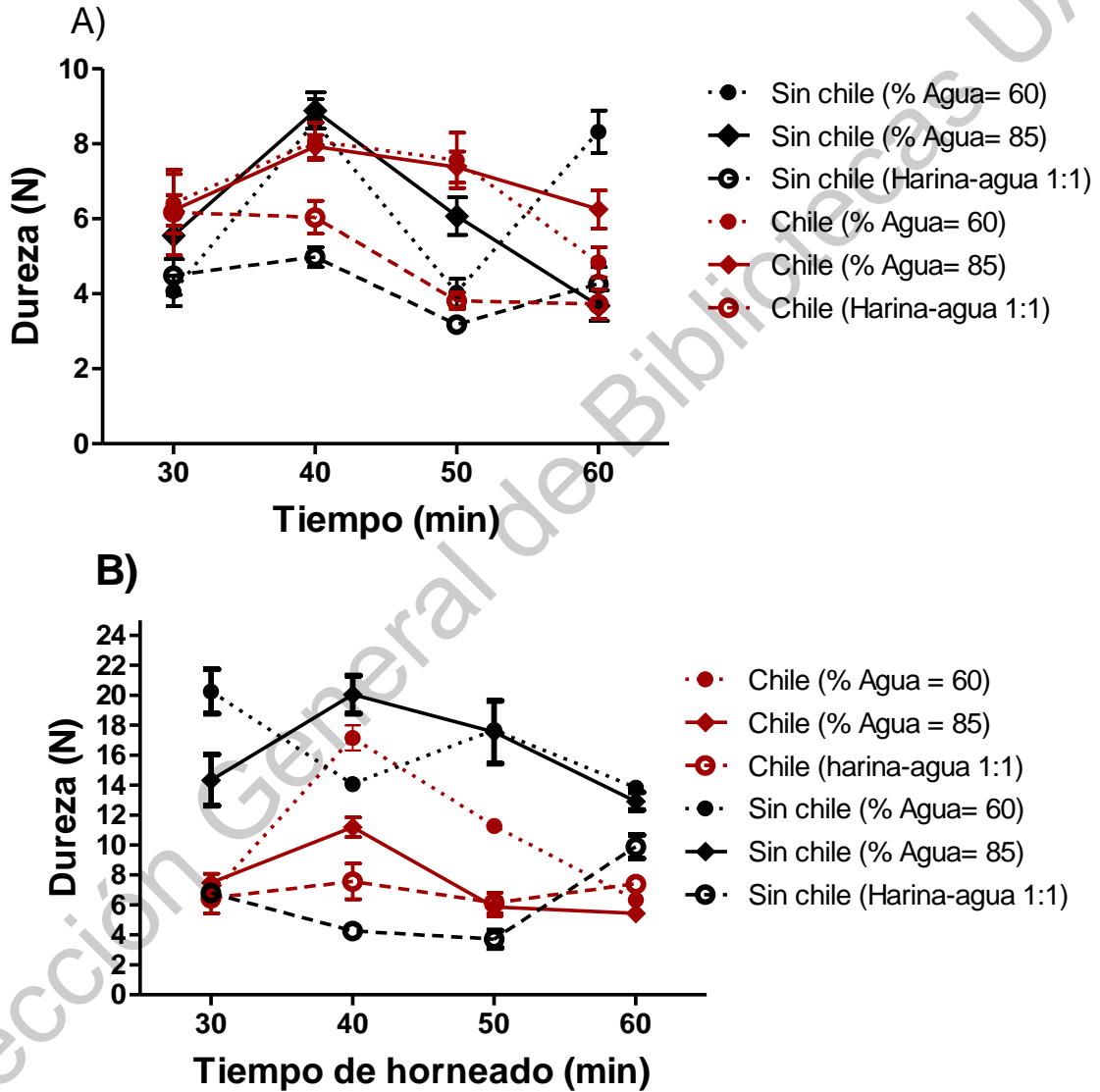


Figura 41. Efecto del porcentaje de agua, adición de chile espolvoreado empleado en la formulación y el tiempo de horneado en la dureza del producto, utilizando: A) amaranto sin molienda B) amaranto molido y tamizado por malla 60.

De todos los tratamientos realizados, el menor valor de dureza ( $3.1786 \pm 0.134$  N) se obtuvo al utilizar amaranto explotado sin moler, 50 minutos de horneado, sin chile espolvoreado y una proporción de harina-agua 1:1. Esta formulación se utilizó para el siguiente diseño experimental.

En la última prueba preliminar, se llevó a cabo un diseño factorial 2 a la 5, con el fin de conocer el efecto del agente leudante (0 y 2%) y el tiempo de horneado (15, 20, 25, 30, 35 minutos en la dureza del producto) (Cuadro 14).

En la Figura 42 se puede apreciar que la adición del agente leudante disminuye la variabilidad en la dureza de los productos durante el tiempo de horneado. En general, la adición de agente leudante propició un aumento en la dureza. El menor valor de dureza ( $6.846 \pm 1.232$  N) se obtuvo al no adicionar el agente leudante con un tiempo de horneado de 20 minutos. A pesar de esto, una mayor crujencia se observó al adicionarlo, esto se puede deber a que el agente leudante contiene bicarbonato lo que permite generar  $\text{CO}_2$  al contacto con agua a una temperatura adecuada, el gas así generado, junto con el vapor de agua y el aire atrapado, ejerce una presión en el interior de la red tridimensional conformada por las proteínas que hace que la masa se expanda y se esponje (Ferrerías, 2009) pudiendo mejorar la crujencia en la botana.

Por otro lado, se observó que a mayor tiempo de horneado la dureza tendió a disminuir, pero es importante mencionar que sensorialmente, la botana se ve afectada ya que se percibe el sabor a quemado, es por eso, que para la evaluación sensorial se decidió presentar la botana horneada a tiempos menores de 20 minutos (15, 17 y 20 minutos) y empleando el agente leudante.

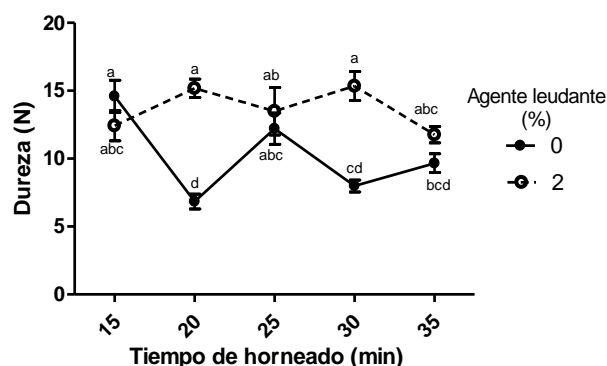


Figura 42. Efecto del tiempo de horneado (min) y del porcentaje de agente leudante en la dureza de la botana.

De acuerdo a los resultados obtenidos a lo largo de los estudios preliminares, en el cuadro 23 se presentan las mejores condiciones para la elaboración final de la botana, teniendo en cuenta las mejoras tecnológicas y dificultades durante el proceso. La única variable que no se estableció fue el tiempo de horneado, el cual se evaluó posteriormente en la percepción sensorial de consumidores en la prueba de evaluación sensorial.

Cuadro 23. Formulación final obtenida a partir de las pruebas preliminares para la elaboración de una botana a base de sorgo y amaranto

Parámetro	Condición
Temperatura del extrusor (°C)	110
Sorgo (%)	60
Amaranto 40 % (molienda)	Entero
Humedad (Proporción de agua)	1:1
Emulsificante (%)	0.2
Chile (espolvoreado)	Sin espolvorear
Conservador (%)	0.05
Agente Leudante (%)	0.2
Otros ingredientes (aditivos %)	2
Temperatura Horneado( °C)	280
Tiempo de Horneado (min)	15-20

#### 5.4 Caracterización física de las muestras

Una vez que se tuvo la formulación final, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica y una prueba con consumidores para evaluar la aceptación del producto a diferentes tiempos de horneado.

El color es un parámetro de calidad importante que afecta en la aceptabilidad de los consumidores hacia un alimento determinado (Nissar y col., 2007). El espacio de color es un método que permite expresar el color de un objeto. La Commission Internationale de Éclairage (CIE), es una organización sin fines de lucro que es considerada como la autoridad en la ciencia de la luz y el color que ha definido espacios de color, incluyendo CIE XYZ, CIE L\*C\*h, y CIE L\*a\*b\*, para comunicar y expresar el color de una manera objetiva (KONICA MINOLTA, 2018). El espacio de color L\*a\*b\* se basa en la teoría de color oponente, la cual establece que dos colores no pueden ser al mismo tiempo rojo y verde o amarillo y azul. L\* indica la luminosidad, es decir la diferencia entre luz y oscuridad, valores positivos hace referencia a que es más luminosa la muestra mientras que los negativos indican una mayor oscuridad. Por otro lado, a\* y b\* se consideran coordenadas cromáticas. Los valores negativos de a\* indican un color verde y los positivos rojos. Por otro lado, valores negativos de b\* indican un color azul y los positivos un color amarillo (Figura 43).

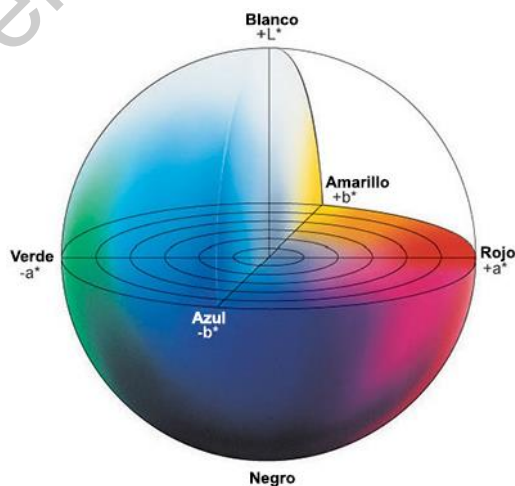


Figura 43. Espacio de color CIE L\*A\*B



Se llevó a cabo la medición del color de las muestras presentadas en la evaluación sensorial en una escala CieLab (Cuadro 24). Se pudo observar que la muestra 213 fue significativamente diferente ( $p < 0.05$ ) en luminosidad ( $47.87 \pm 0.18$ ) en comparación con la muestra 468 ( $38.91 \pm 0.32$ ) y 578 ( $37.50 \pm 0.33$ ). Lo cual se atribuye a que un mayor tiempo de horneado produce pérdida de luminosidad.

Cuadro 24. Caracterización física de las muestras aplicadas en el sensorial

Tiempo de horneado (minutos)	L	a	B	Dureza (N)
15	$47.87 \pm 0.18^a$	$13.69 \pm 0.18^a$	$26.59 \pm 0.77^a$	$5.71 \pm 0.52^a$
17	$38.91 \pm 0.32^b$	$12.91 \pm 0.32^b$	$22.85 \pm 0.26^b$	$4.21 \pm 1.25^b$
20	$37.50 \pm 0.33^b$	$12.76 \pm 0.14^b$	$21.10 \pm 0.33^c$	$3.21 \pm 0.74^b$

Se muestra la media  $\pm$  desviación estándar. Letras diferentes entre la misma columna son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ )

En cuanto a la cromaticidad la muestra 213 presentó un mayor valor de  $a^*$  ( $13.69 \pm 0.18$ ) lo que expresa un color más rojo con respecto a la muestra 468 ( $12.91 \pm 0.32$ ) y 578 ( $12.76 \pm 0.14$ ) que no tuvieron diferencia ( $p < 0.05$ ). El mismo comportamiento se mostró para  $b^*$  cuyo valor en la muestra 213 fue de  $26.59 \pm 0.77$  con respecto a la muestra 468 ( $22.85 \pm 0.26$ ) y a la 578 ( $21.10 \pm 0.33$ ), indicando un color más amarillo de la primera muestra.

Es importante mencionar, que el agente leudante utilizado contiene bicarbonato de sodio y algunos estudios han reportado que la presencia de éste permite obtener productos extruidos con mayores valores de  $a^*$  y  $b^*$  pero una menor luminosidad (Singh y col., 2000).

Se evaluó también la dureza de cada una de las muestras. El mayor valor de dureza lo obtuvo la muestra 213 ( $5.71 \pm 0.52$  N) que es la que se sometió a un menor tiempo de horneado, mientras que la 468 ( $4.21 \pm 1.25$  N) y la 578 ( $3.21 \pm 0.74$  N) no presentaron diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre ellas.

## 5.5 Evaluación sensorial

Las pruebas afectivas se basan en la medición de preferencia y aceptabilidad de un producto. Éstas no sólo nos permiten establecer si hay o no diferencia entre muestras, sino que también nos permiten saber el sentido o magnitud de estas diferencias (Liria, 2008). Este tipo de pruebas determinan la respuesta de un gran grupo de personas ya que el número de panelistas va de 50 a 100 (Meilgaard, et al., 2016).

Se pueden encontrar dos tipos de pruebas afectivas: las pruebas de preferencia y las pruebas de aceptabilidad. En muchos casos se tiene una confusión con estos dos conceptos, sin embargo, tienen una terminología diferente. La aceptabilidad indica el grado de gusto o disgusto que se tiene de un producto, se basa en la escala de medición de una persona y de su comportamiento; mientras que preferencia se refiere a la elección de un producto entre varios basándose en el gusto o disgusto (Liria, 2008), donde el principal propósito de las pruebas afectivas es el evaluar la respuesta personal (preferencia o aceptación) en consumidores regulares o potenciales respecto a un producto, su idea o alguna característica específica (Meilgaard, et al. 2016).

Para llevar a cabo la evaluación sensorial, las muestras de botana (churritos) fueron previamente codificadas como se indica a continuación: 213 corresponde a 15 minutos, 468 a 17 minutos de horneado y 578 a 20 minutos de horneado (Figura 44). Se reclutaron a 75 panelistas, sin embargo, 3 de ellos dejaron atributos sin responder, por lo que fueron descartados para los análisis posteriores.

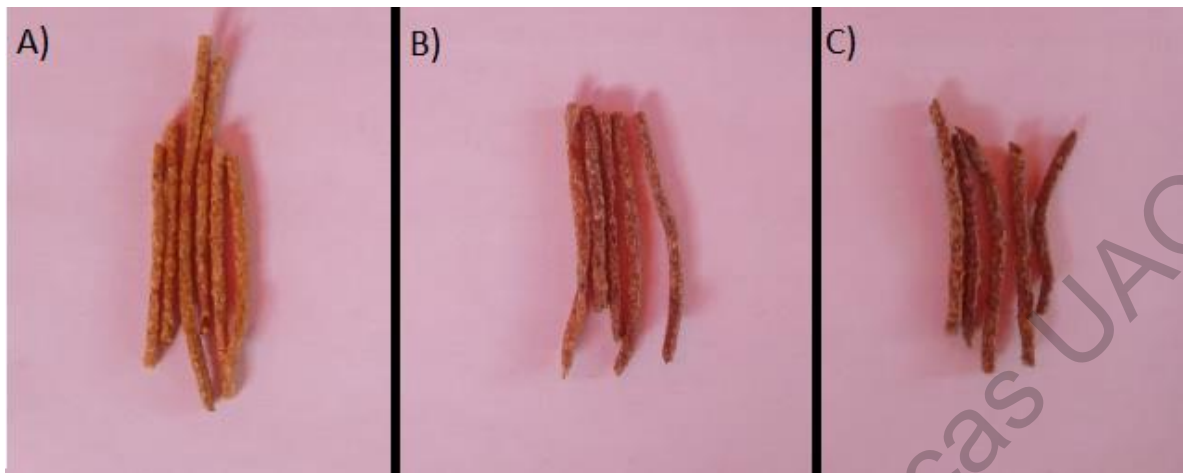


Figura 44. Muestras evaluadas de churritos en el análisis sensorial. A) Muestra 213; 15 minutos de horneado, B) muestra 468; 17 minutos de horneado y C) Muestra 578; 20 minutos de horneado.

Los resultados de la evaluación sensorial se muestran en el Cuadro 25 para las botanas elaboradas a diferentes tiempos de horneado ya que este es uno de los factores que faltaba por definir y el cual afecta directamente en las características físicas y sensoriales de la botana elaborada. De acuerdo al análisis estadístico Kruskal Wallis no existe una diferencia significativa en la evaluación de la crujencia y textura general en las tres muestras, sin embargo, en los restantes atributos evaluados sí. En cuanto a la apariencia, las muestras 213-578 presentaron diferencias estadísticas debido al incremento en el tiempo de cocción, lo cual también se vio reflejado en el color las muestras, teniendo una variación estadística entre 468-578 y 213-578. La mayor puntuación para estas variables fue para los tiempos de horneado más cortos.

En cuanto al sabor y la intensidad de sabor, sí hubo diferencia en las tres muestras teniéndose una mayor aceptación en la muestra 213. En la percepción del sabor salado no hubo diferencias significativas entre las muestras 468-578 pero sí con respecto a la muestra 213-468 y 213-578, en donde la muestra 213 tuvo una mayor calificación con respecto a las otras dos muestras. En crujencia y textura general no hubo diferencias significativas en las tres muestras. El panel detectó un resabio entre las muestras, teniendo una menor aceptación la muestra 578 que corresponde al

mayor tiempo de horneado. Probablemente este atributo fue el que más contribuyó a que esta muestra obtuviera el menor agrado general.

Cuadro 25. Resultados de la prueba sensorial llevado a cabo a las distintas muestras de churritos.

Atributo	Muestras		
	213	468	578
Apariencia	6.5 (130.4) <sup>a</sup>	5 (116.3) <sup>ab</sup>	5 (78.8) <sup>b</sup>
Color	7 (134.8) <sup>a</sup>	7 (117.8) <sup>a</sup>	5 (73) <sup>b</sup>
Sabor	7 (134.2) <sup>a</sup>	5 (112.9) <sup>b</sup>	4.5 (78.3) <sup>c</sup>
Intensidad de sabor	7 (131.7) <sup>a</sup>	5 (107) <sup>b</sup>	5 (86.7) <sup>c</sup>
Intensidad de sabor salado	7 (129.6) <sup>a</sup>	5 (107.2) <sup>b</sup>	5 (88.7) <sup>b</sup>
Resabio	7 (138.3) <sup>a</sup>	5 (112.4) <sup>b</sup>	4 (74.8) <sup>c</sup>
Crujencia	7 (112.3) <sup>a</sup>	7 (108) <sup>a</sup>	7 (105.2) <sup>a</sup>
Textura general	7 (111.4) <sup>a</sup>	7 (110.5) <sup>a</sup>	7 (103.6) <sup>a</sup>
Agrado general	7 (129.7) <sup>a</sup>	5 (110) <sup>b</sup>	5 (85.8) <sup>c</sup>

Puntuaciones del panel sensorial (n=72) basadas en una escala hedónica de 9 puntos, donde 1 significa “me disgusta muchísimo”, 2 “me disgusta mucho”, 3 “Me disgusta”, 4 “Me disgusta levemente”, 5 “No me gusta ni me disgusta”, 6 “Me gusta levemente”, 7 “Me gusta”, 8 “Me gusta mucho” y 9 “me gusta muchísimo”. Muestra 213; 15 minutos de horneado, muestra 468; 17 minutos de horneado y Muestra 578; 20 minutos de horneado. Los resultados se expresan como la mediana (Valor del promedio) de las diferentes muestras. Valores con letras minúsculas diferentes en la fila indican diferencia significativa entre las muestras en la prueba de Kruskal Wallis (p<0.05).

La Figura 45 engloba la puntuación de cada una de las muestras para todos los atributos. Se encontró que la muestra 213 obtuvo de forma general un valor de 7 que corresponde a un “Me gusta”, siendo excepción el atributo apariencia el cual se encuentra entre “Me gusta levemente” y “Me gusta”.

Por otro lado, la muestra 468 obtuvo resultados de “No me gusta ni me disgusta” en la apariencia, sabor, intensidad de sabor, resabio, así como agrado general, pero en cuanto al color, crujencia y textura general obtuvo calificación de 7 que corresponde a un “Me gusta”.

La muestra 578 obtuvo calificaciones de “Me disgusta levemente” en el resabio y en el sabor, en la textura y crujencia un “Me gusta” y en todos los atributos restantes un “No me gusta ni me disgusta”.

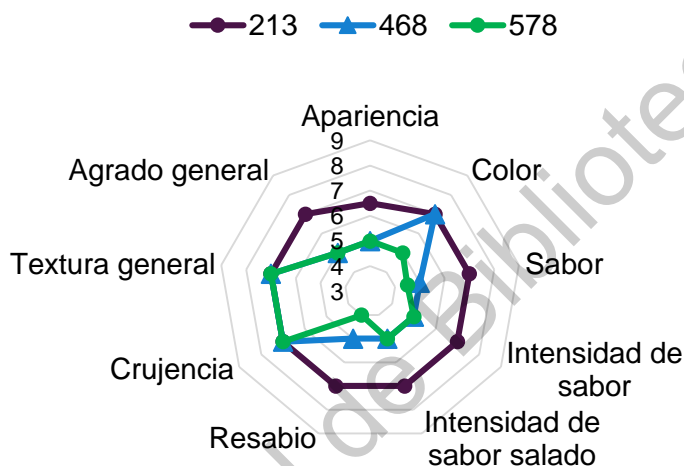


Figura 45. Gráfico de los resultados de los atributos evaluados para la prueba sensorial en las tres muestras de churritos donde: muestra 213; 15 minutos de horneado, muestra 468; 17 minutos de horneado y Muestra 578; 20 minutos de horneado.

La combinación de factores sensoriales y no sensoriales puede generar información más completa y realista sobre la intención de compra que el consumidor tendrá hacia un determinado producto (Pinto, 2017). Es por esto que es importante mencionar, que en esta evaluación a los panelistas sólo se les dio a probar la botana, es decir, no se les proporcionó información sobre costos, empaque, contenido nutrimental ni beneficios a la salud. Lo anterior debido a que el objetivo de la evaluación era saber si los panelistas realmente aceptaban el producto por sí mismo y no por factores no sensoriales. Esto es importante debido a que las características del empaque pueden llevar al consumidor a comprar un producto, pero son las características

sensoriales las que confirmarán su aceptación y podrán influir en su decisión de compra posterior (Pinto, 2017)

Para la intención de compra se empleó una escala de 5 puntos, donde 1 es “Definitivamente no lo compraría”, 2 “Probablemente no lo compraría”, 3 “No sé si lo compraría o no”, 4 “Probablemente sí lo compraría” y 5” Definitivamente sí lo compraría”. De acuerdo a los resultados (Cuadro 26), hay una diferencia significativa hacia la intención de compra entre las tres muestras, siendo la 213 con la mayor probabilidad de ser comprada y la 578 con la menor probabilidad debido principalmente a su resabio. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estos resultados podrían cambiar si se hubiera proporcionado una mayor información al panelista, como la presentación del envase, proceso de elaboración empleado, el precio o incluso el tipo de materia prima con la que fue elaborada la botana. Se ha demostrado que ingredientes pocos comunes y con un posible beneficio a la salud, atraen más la atención del consumidor (Pinto, 2017), sin embargo, esto podría causar un error de expectativa (Meilgaard, 2016) Es importante tener en cuenta que en muchos casos las personas son capaces de aceptar un sabor neutral o incluso desagradable, siempre y cuando el consumo de este producto esté vinculado a una recompensa o beneficio (Drewnoski y col., 1997).

Cuadro 26. Resultados sobre la intención de compra hacia las distintas muestras de churritos en una escala de 5.<sup>1,2</sup>

<b>Atributo / Muestra</b>	<b>213</b>	<b>468</b>	<b>578</b>
Intención de compra	4 (81.3) <sup>a</sup>	3 (63.7) <sup>b</sup>	3 (53.8) <sup>c</sup>

<sup>1</sup>Puntuaciones del panel sensorial (n=72) basadas en una escala hedónica de 5 puntos, donde 1 “Definitivamente no lo compraría”, 2 “Probablemente no lo compraría”, 3 “No sé si lo compraría o no”, 4 “Probablemente sí lo compraría” y 5” Definitivamente sí lo compraría”

<sup>2</sup> Se muestra la media (valor del promedio). Medias con letras minúsculas diferentes en la fila indican diferencia significativa entre las muestras en la prueba de Kruskal Wallis (p<0.05).

La muestra preferida por los consumidores fue la 213 y por lo tanto se usó para realizar los análisis posteriores. Entre los comentarios escritos en la hoja de evaluación, algunos panelistas mencionan que les gustaría que los churros fueran un poco más gruesos. Además, existió controversia de opiniones en cuanto al resabio, ya que algunos mencionaron que les agradaba mucho el resabio a “quemado o ahumado” de las muestras 468 y 578 y otros que lo consideraban muy fuerte o no de su agrado.

Considerando las observaciones y resultados obtenidos por parte de los panelistas, un punto de mejora en el producto es; mantener las condiciones de formulación y mejorar el diámetro de los churros, así como evitar tener un producto con un sabor a “ahumado o quemado” el cual para algunos podría ser considerado como un resabio desagradable.

## 5.6 Caracterización del producto final y materia prima

### 5.6.1 Caracterización física

Una vez que se eligió la formulación con mayor preferencia por parte de los consumidores, se procedió a su caracterización. Como se mencionó anteriormente, la muestra sometida a 15 de horneado fue la preferida por los evaluadores. También se caracterizó la materia prima que se empleó para su elaboración las cuales fueron sometidas a las mismas condiciones en el proceso de extrusión y horneado incluyendo los aditivos (Figura 46) esto con el fin de conocer el efecto del procesamiento sobre los atributos físicos, los componentes químicos y nutracéuticos de los componentes de la botana y de esta manera comprender mejor de dónde surgen o a qué podrían atribuirse las características presentadas en el producto final.



Figura 46. Muestras a analizar: A) Sorgho extruido y horneado B) Amaranto extruido y horneado C) Churro seleccionado en la evaluación sensorial

En el Cuadro 27 se presenta el rendimiento obtenido en la elaboración de la botana. Del 100% de la harina e ingredientes que se utiliza para la elaboración de la botana, se obtiene 79.39% en forma de producto final.

Cuadro 27. Rendimiento en la elaboración del producto

<b>Muestra</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Harina empleada para la elaboración de la botana (60% sorgo-40% amaranto)	161	100%
Botana obtenida (churros)	79.39	49.31%

#### 5.6.1 Caracterización física del producto y materia prima

Nuevamente se realizó la caracterización del producto final y de cada una de las materias primas. En el Cuadro 28 se presenta la caracterización física de la botana desarrollada, la materia prima y la comparación con respecto a una botana comercial.



Cuadro 28. Caracterización física de la botana elaborada, una botana comercial y la materia prima extruida y horneada

Muestra	L	A	b	Dureza (N)
Amaranto extruido	48.67 ± 0.27 <sup>b</sup>	12.22 ± 0.13 <sup>c</sup>	23.77 ± 0.27 <sup>d</sup>	6.14 ± 0.97 <sup>c</sup>
Sorgo extruido	54.21 ± 0.02 <sup>a</sup>	11.26 ± 0.01 <sup>d</sup>	24.95 ± 0.02 <sup>c</sup>	14.41 ± 0.89 <sup>b</sup>
Churro elaborado	47.87 ± 0.18 <sup>b</sup>	13.69 ± 0.18 <sup>a</sup>	26.59 ± 0.77 <sup>b</sup>	5.71 ± 0.52 <sup>c</sup>
Churro comercial	55.16 ± 0.07 <sup>a</sup>	12.87 ± 0.13 <sup>b</sup>	34.75 ± 0.07 <sup>a</sup>	17.46 ± 1.49 <sup>a</sup>

Se muestra la media ± desviación estándar (n=5). Letras diferentes entre la misma columna son significativamente diferentes a la prueba de Tukey (p<0.05).

Se puede observar que el churro comercial presentó un mayor valor de luminosidad (55.16 ± 0.07) con respecto al desarrollado en el presente proyecto (47.87 ± 0.18). Mismo comportamiento se observó en a\* donde el valor fue mayor en el churro a base de sorgo y amaranto (13.69 ± 0.18) que en el comercial (12.87 ± 0.13). Caso contrario ocurrió en b\* donde éste último presentó un valor de 34.75 ± 0.07 y el elaborado de 26.59 ± 0.77. Existiendo entre éstos una diferencia significativa (p<0.05).

La diferencia de color es definida como la comparación numérica de una muestra con el estándar. Sin embargo, muchas veces para el ojo humano es difícil diferenciar un tono de otro, es por eso que se hace necesario emplear un método más objetivo. El término delta E ( $\Delta E$ ) se deriva de la palabra alemán "sensación" por lo tanto hace referencia a una "diferencia en sensación", al emplear el asterisco ( $\Delta E^*$ ) se hace referencia a que es una diferencia de color CIELAB. En otras palabras, ( $\Delta E^*$ ) nos indica de manera objetiva qué tan diferente es una muestra en su color, respecto a otra. Cuando  $\Delta E^*=1$  indica que no existe diferencia entre lo medido y lo visualizado, cuando  $\Delta E^*=3$  se considera que la diferencia de color no es perceptible para el ojo humano (KONICA MINOLTA, 2016). La diferencia de color ( $\Delta E^*$ ) entre la botana desarrollada y la comercial fue de 10.97 siendo perceptible a simple vista.

Por otro lado, en los valores de dureza (Cuadro 28) existe una diferencia significativa en ambos churros. El churro comercial presentó un valor de 17.46 ± 1.49 N, mientras

que el elaborado a base de sorgo y amaranto presentó una dureza de  $5.71 \pm 0.51$  N lo cual nos da un producto más suave, con mayor potencial de ser del agrado de los consumidores. Sin embargo, hay que considerar que el churro comercial presenta un diámetro de 8 mm, mientras que el elaborado es de 4 mm (Figura 47). El sorgo extruido fue el material que tuvo un mayor valor de dureza ( $14.41 \pm 0.89$  N) con respecto al amaranto ( $6.14 \pm 0.97$  N).



Figura 47. Muestras analizadas físicamente: A) Sorgo extruido, B) Amaranto extruido C) churro elaborado D) Churro comercial

### 5.6.2 Análisis proximal

En el cuadro 29 se presenta la caracterización bromatológica de un churro comercial (harina de maíz y trigo), la botana desarrollada (harina de sorgo nixtamalizada y amaranto explotado), así como la materia prima. En esta ocasión se incluye también la caracterización de los materiales con y sin el proceso de extrusión y horneado. Durante la cocción por extrusión, la materia prima experimenta transformaciones químicas y estructurales que conducen a la formación de una gran variedad de productos. Algunos cambios químicos que se producen son la conversión (gelatinización y fusión) del almidón; desnaturalización y reticulación de proteínas, formación de complejos entre la amilosa y los lípidos, reacciones de Maillard en presencia de azúcares y las reacciones de degradación de algunos polímeros y otras moléculas. Además, se pueden destruir factores antinutricionales y enzimas indeseables o especies microbianas (Ilo y col., 2000).

Cuadro 29. Resultados de los análisis proximales del amaranto, sorgo, amaranto extruido, sorgo extruido, churro y churro comercial

Muestra	Humedad (%)	Proteínas* (%)	Lípidos (%)	Cenizas (%)	Carbohidratos (%)	Fibra total**	
						Fibra soluble** (%)	Fibra insoluble** (%)
A	2.35±0.39 <sup>c</sup>	17.16±0.48 <sup>a</sup>	7.84±0.18 <sup>b</sup>	2.78±0.09 <sup>c</sup>	69.87±0.76 <sup>c</sup>	3.01±0.87 <sup>a</sup>	20.56±0.87 <sup>a</sup>
AE	7.78±0.16 <sup>a</sup>	14.79±0.11 <sup>b</sup>	5.47±0.11 <sup>c</sup>	5.41±0.07 <sup>a</sup>	66.56±0.09 <sup>d</sup>	2.80±0.44 <sup>a</sup>	19.48±0.44 <sup>ab</sup>
S	7.77±0.18 <sup>a</sup>	12.18±0.18 <sup>d</sup>	3.19±0.01 <sup>d</sup>	1.32±0.17 <sup>d</sup>	75.54±0.27 <sup>b</sup>	1.83±0.51 <sup>a</sup>	16.16±0.51 <sup>c</sup>
SE	3.57±0.04 <sup>b</sup>	12.01±0.29 <sup>d</sup>	1.04±0.18 <sup>e</sup>	4.62±0.31 <sup>b</sup>	78.76±0.16 <sup>a</sup>	2.18±0.91 <sup>a</sup>	17.56±0.36 <sup>bc</sup>
C	2.45±0.07 <sup>c</sup>	13.81±0.29 <sup>c</sup>	2.79±0.06 <sup>d</sup>	5.55±0.11 <sup>a</sup>	75.39±0.39 <sup>b</sup>	2.24±0.15 <sup>a</sup>	17.30±0.72 <sup>bc</sup>
CC	1.35±0.11 <sup>d</sup>	9.05±0.24 <sup>e</sup>	20.65±0.28 <sup>a</sup>	2.76±0.16 <sup>c</sup>	66.18±0.23 <sup>d</sup>	2.51±0.17 <sup>a</sup>	12.12±1.59 <sup>d</sup>

Se muestra la media ± desviación estándar en base húmeda (n=3. Las medias que no comparten una letra entre la misma columna son significativamente diferentes en la prueba de Tukey (p<0.05).

Donde A: Amaranto explotado, AE: Amaranto explotado, extruido y horneado, S: Sorgo nixtamalizado, SE: Sorgo nixtamalizado, extruido y horneado, C: Churro elaborado a base de sorgo y amaranto, CC: Churro comercial a base de maíz y trigo

\*Amaranto N x 5.85, Sorgo, churro N x 6.25\*\* % Expresado en base al contenido de carbohidratos presente en las muestras en b.s.

El amaranto presentó mayor humedad durante el proceso de extrusión y horneado (7.78 ± 0.16 %) con respecto al no extruido (2.35 ± 0.39 %) existiendo entre ellos una diferencia estadística significativa (p<0.05). De acuerdo a lo publicado por Resio y col., (2014) la humedad del amaranto se encuentra entre 5 y 35% antes de ser procesado por lo que los valores obtenidos en el presente proyecto se pueden considerarse dentro del intervalo reportado.

En el caso del sorgo, éste presentó una menor humedad después del proceso de extrusión y horneado (3.57 ± 0.04 %) a diferencia de la harina de sorgo nixtamalizada (7.77 ± 0.18 %) existiendo una diferencia estadística (p<0.05) entre ellos. De acuerdo a estudios publicados por Llopart (2011) la harina de sorgo presenta un valor de 13.8

$\pm 0.02$  % de humedad y para la harina de sorgo después de extrudir un valor de  $8.15 \pm 0.42$  %. Por otra parte, Martínez y col., (1992) reportaron 10.5 % para harina de sorgo sin extrudir y 9.1% para la extruida. Los valores obtenidos en el presente proyecto se encuentran por debajo de lo reportado. Esto podría ser beneficioso ya que Contreras (2009) menciona que productos mayores a 10% de humedad pueden ser susceptible a la contaminación microbiana y desarrollo de levaduras y hongos. Productos menores al 10% puede ayudar a la conservación, además de retardar algunos procesos como la oxidación de los lípidos y la reducción en la actividad enzimática (Figura 50)

Por otra parte, el churro desarrollado a partir de sorgo y amaranto presenta una mayor cantidad de humedad ( $2.45 \pm 0.07$  %) que el churro comercial ( $1.35 \pm 0.11$  %), existiendo una diferencia estadística significativa entre estas dos muestras. Es importante resaltar que la humedad presente en ambos, es adecuada (Figura 48), ya que la que la humedad está relacionada principalmente con la vida de anaquel de un producto siendo más estable a menores valores de actividad de agua y contenido de humedad. (Contreras, 2009).

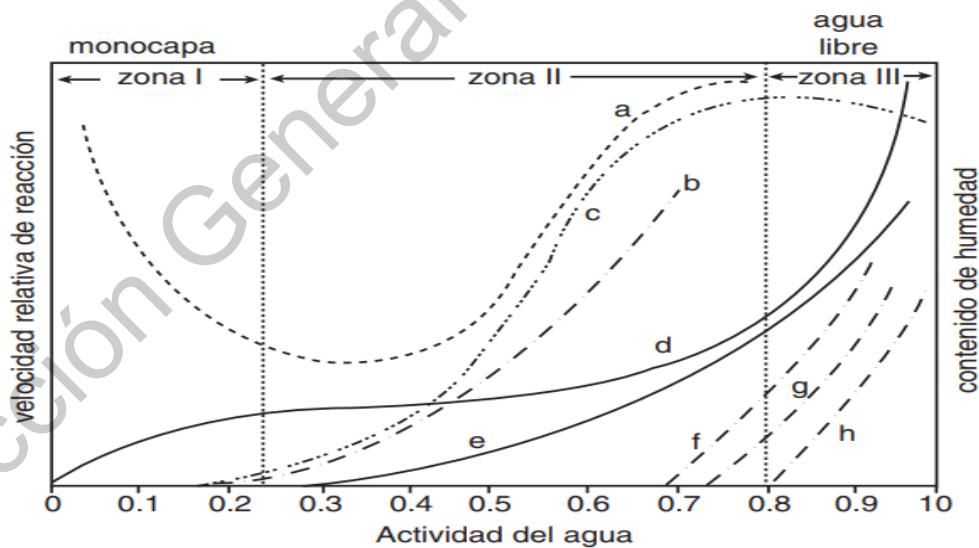


Figura 48. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua a) Oxidación de los lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras; h) crecimiento de bacterias.

En el Cuadro 31 también se puede observar que el amaranto sometido al proceso de extrusión y horneado presentó un contenido de proteína menor ( $14.79 \pm 0.11$  %) con respecto al amaranto sin tratamiento ( $17.16 \pm 0.48$  %), existiendo entre estos dos una diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). El porcentaje de proteínas obtenidas en el amaranto crudo ( $17.16 \pm 0.48$  %), es similar a lo reportado por Álvarez- Jubete y col., (2009) (17.5%) y lo reportado por Corke y col., (2016) (17.9%). En cuanto al porcentaje de proteínas obtenido en el amaranto extruido ( $14.79 \pm 0.11$  %) entra en el rango del 14-15 % reportado por Ilo y col., (2000).

Estudios han demostrado que el valor nutricional de las proteínas de los cereales aumenta según las condiciones de extrusión empleadas, lo que permite que aumente la digestibilidad. Esto se debe a la desnaturalización de proteínas, la inactivación de los inhibidores de enzimas en materias primas y / o la exposición de nuevos sitios activos para enzimas digestivas (Fellows, 2017).

En el caso de la harina de sorgo nixtamalizada, el porcentaje de proteínas fue de  $12.18 \pm 0.18$  % no habiendo una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con respecto al sorgo extruido que presentó un valor de  $12.01 \pm 0.29$  %.

El valor de porcentaje de proteínas de harina de sorgo nixtamalizada que se presentó ( $17.16 \pm 0.48$  %), fue mayor a lo publicado por Serna-Saldivar y col., (1998) donde se reportó un valor de 11.34%; en tanto Sánchez (2014), menciona un valor de 9.20% y Cabrera-Ramírez (2015) reportó un valor de  $9.81 \pm 1.1$ %. El porcentaje de proteínas que se presentó en el sorgo extruido ( $12.01 \pm 0.29$  %) es mayor al rango de 10-11% reportado por Ilo y col., (2000). Las diferencias presentadas pueden deberse a las condiciones de nixtamalización llevadas a cabo por los autores, así como el tipo de sorgo utilizado. Cabrera- Ramírez sometió al sorgo a una cocción de 30 minutos, mientras que el presente trabajo fue a 20 min. Mientras que Ilo y col., (2000) no reporta las condiciones.

El churro desarrollado a base de harina de sorgo y amaranto presentó un contenido de  $13.81 \pm 0.29$  % de proteínas, siendo diferente al contenido de proteína de la botana comercial  $9.05 \pm 0.24$  %.

Es importante destacar, que a pesar de que el contenido de proteínas en el sorgo es alto, éstas se han considerado pobremente digeridas en la alimentación (Rakshit y

Wang, 2016) debido a que el 77-83% de las proteínas del endospermo son prolaminas, conocidas como kafirinas (Belton y col., 2006), las cuales forman cuerpos proteicos esféricos cuyo interior se compone de  $\alpha$ -kafirinas mientras que la capa externa se compone de kafirinas  $\beta$  y  $\gamma$  que forman enlaces disulfuro de manera inter e intramolecular. Estos cuerpos se encuentran embebidos en una matriz de glutelinas y rodeados de gránulos de almidón (Mesa y col., 2010). Según algunas investigaciones, el entrecruzamiento de kafirinas y la formación de enlaces disulfuro son las causas de la disminución de la digestibilidad (Chiquito-Almanza y col., 2011). Afortunadamente, estudios han demostrado que la acción mecánica del proceso de extrusión permite degradar simultáneamente el almidón y romper los cuerpos de proteínas que limitan la funcionalidad y la digestibilidad de las proteínas de este cereal (Mesa y col., 2012).

Por otro lado, se considera que la calidad proteica del sorgo es pobre debido a su bajo contenido de aminoácidos esenciales como la lisina y treonina en comparación con otros cereales (Ensmiger, 2000). Sin embargo, el amaranto presenta un gran contenido de aminoácidos esenciales como lisina, metionina, cisteína e histidina y con una digestibilidad de 68.8-75.4% (Taylor y col., 2017), por lo que la combinación de ambas materias primas permite el enriquecimiento o la fortificación de la botana desarrollada que, gracias a la naturaleza de su materia prima, es libre de gluten, lo que lo hace un alimento ideal para celíacos (Vieira, 2015; Singh y col., 2019). La enfermedad celíaca es un trastorno digestivo que afecta al intestino delgado. Esta enfermedad puede causar problemas digestivos a largo plazo e impedir la obtención de nutrientes necesario. En México, se calcula que más del 1 al 4.3% de la población padece esta enfermedad y aún no se han dado cuenta mientras que en países desarrollados se calcula que por cada persona con esta enfermedad 5 no se han diagnosticado (NIH,2012) mientras que la prevalencia media mundial se ha estimado en 1:266 (Taylor y col., 2006).

En cuanto al contenido de lípidos, la materia prima que fue sometida a un proceso de extrusión y horneado presentó valores menores de grasa con respecto a la que no. En el Cuadro 31 se observa que el porcentaje de lípidos en el amaranto crudo fue de  $7.84 \pm 0.18$  % mientras que en el amaranto extruido y horneado se obtuvo un

valor de  $5.47 \pm 0.11$  %. Tendencia similar se observó en el sorgo, en donde la harina que sólo fue nixtamalizada presentó un valor de  $3.19 \pm 0.01$  % mientras que el valor de la harina de sorgo extruida fue de  $1.04 \pm 0.18$  %. Lo anterior puede deberse a que el porcentaje de lípidos extraídos con el éter de petróleo indican la cantidad de lípidos libres presentes en la muestra, ya que tanto éste como el hexano no pueden romper las interacciones iónicas, de hidrógeno ni las hidrófobas, es decir, sólo puede extraer lípidos no enlazados. La disminución de la cantidad de lípidos extraíbles en éter después del proceso de extrusión podría indicar que se llevó a cabo la unión del lípido a amilosa (Madonna y col., 2013). Esto tiene sentido ya que, durante la cocción por extrusión, la estructura nativa de la amilosa se destruye parcialmente, y se forma una nueva estructura cristalina, lo que permite la formación de complejos de amilosa-lípido en la harina de sorgo (Jafari y col., 2016).

Este complejo tiene una influencia importante en la estructura, textura y otras propiedades funcionales de los productos extruidos (Madonna y col., 2013). Se ha comprobado que el aumento de la fuerza de cizalla con un bajo contenido de humedad puede aumentar la disponibilidad de cadenas de amilosa, mientras que las altas temperaturas promueven el movimiento molecular. Por lo tanto, la producción de los complejos de amilosa-lípidos son favorecidos con un menor contenido de humedad y mayor temperatura durante el proceso de extrusión (Jafari y col., 2016). El contenido de lípidos presentado en el amaranto crudo ( $7.84 \pm 0.18$  %) es muy cercano al valor de 7.7% reportado por Corke y col., (2016) pero superior al valor de 5.7% publicado por Álvarez-Jubete y col. (2009) lo cual puede deberse a la especie de amaranto utilizado por el autor (*Amarantus caudatus*). El porcentaje de lípidos presentados en el amaranto extruido ( $5.47 \pm 0.11$ ) es menor al rango de 6-9% reportado por Ilo y col., (2000). Esta diferencia puede deberse a las condiciones de extrusión y horneado son distintas a las utilizadas por este autor, el cual no las reporta.

Por otro lado, el contenido de lípidos en la harina de sorgo nixtamalizado ( $3.19 \pm 0.01$  %) presentó un valor superior a los reportados por Serna-Saldivar y col., (1998), donde se obtuvo un contenido de 2.98%, Sánchez (2014) que reporta un valor de 2.74% y Cabrera- Ramírez, (2015) que menciona un valor de  $2.43 \pm 0.12$  %. El

contenido de lípidos obtenidos en el sorgo extruido ( $1.04 \pm 0.18 \%$ ) es menor al rango de 2-5% reportado por Ilo y col., (2000). Lo anterior, puede deberse a las diferentes condiciones utilizadas en la nixtamalización del sorgo.

Los churros comerciales generalmente se someten a un proceso de freído (Figura 49) ya que este proceso no sólo cocina alimentos rápidamente, sino que proporciona atributos sensoriales únicos y atractivos para el consumidor, como los colores, aromas, sabores y texturas.



Figura 49. Proceso de elaboración del churro comercial (Tostelusa, 2015)

Al freír se lleva a cabo un proceso de deshidratación en el alimento al ser sumergido en aceite que se encuentra a alta temperatura ( $180^{\circ}\text{C}$ ). Se lleva a cabo una transferencia simultánea de calor y masa, lo que resulta en un flujo a contracorriente de vapor de agua (burbujas) y aceite en la superficie de los alimentos, pero este intercambio de agua por aceite no se produce simultáneamente. Se ha sugerido que el aceite se absorbe principalmente durante la etapa de enfriamiento de la fritura, ya que durante la primera etapa (inmersión del alimento en el aceite) el escape vigoroso de vapor de agua evita que se lleve a cabo la absorción de aceite y además produce una presión interna en el alimento. En esta etapa también se produce el secado de la superficie del alimento debido a su exposición a la alta temperatura (Cortés y col., 2014). Se considera que la etapa de enfriamiento es cuando la pieza frita se retira del aceite, provocando que su temperatura disminuya, el vapor se condense y se



pierda la presión interna del producto, generándose un “efecto de vacío” que provoca la penetración del aceite por succión (Pedreschi y col., 2018) Sin embargo, a pesar de sus posibles ventajas sensoriales, actualmente, los consumidores demandan alimentos más saludables y con menores contenidos de aceite. Es por esto que para el churro a base de sorgo y amaranto no se utilizó este proceso (Figura 50), sino que la masa se sometió a una pre-cocción en el extrusor y posteriormente un proceso de horneado, lo cual permitió que la botana desarrollada presentara casi 10 veces menos el contenido de lípidos ( $2.79 \pm 0.06 \%$ ) que la botana comercial ( $20.65 \pm 0.28\%$ ). Esto es importante, ya que México es actualmente el segundo país con el mayor número de personas obesas (OCDE, 2017) lo cual puede desencadenar el riesgo de enfermedades crónicas. En 2017 las principales causas de muerte fueron las enfermedades de corazón y diabetes mellitus, las cuales podrían haberse evitado si se llevara a cabo una dieta adecuada en la población y con menor contenido de grasa.



Figura 50. Proceso de elaboración del churro desarrollado

Por otro lado, el valor de cenizas es un indicador del contenido total de minerales en forma de sales, en donde no se diferencia el tipo de mineral presente. El contenido de minerales en los cereales depende del tipo de molienda, el proceso de refinación donde se eliminan las capas externas y el germen (Dyner y col., 2016). En el presente trabajo, la materia prima que fue extruida y horneada presentó un mayor porcentaje de cenizas en comparación con la que no. El porcentaje de cenizas en el amaranto extruido fue de  $5.41 \pm 0.07 \%$  siendo estadísticamente diferente con respecto al amaranto sin extrudir cuyo valor fue de  $2.78 \pm 0.09 \%$ . En el caso del sorgo también se obtuvo una diferencia estadística entre el no extruido ( $1.32 \pm 0.17 \%$ ) con respecto

al extruido y horneado ( $4.62 \pm 0.31$  %). Esto puede atribuirse al chile y demás aditivos adicionados en la masa del producto a extruir.

Es importante mencionar, que una de las ventajas atribuidas al proceso de extrusión es que puede aumentar la biodisponibilidad de minerales debido a la destrucción de propiedades antinutricionales como ácido fítico y taninos (Wani y Kumar, 2015). El ácido fítico o el hexafosfato de mio-inositol (InsP6) es un compuesto con carga negativa, que tiene la capacidad de acomplejar cationes con carga positiva, como calcio, magnesio y hierro por lo que podría tener efectos negativos sobre la biodisponibilidad de minerales en el amaranto y otros cereales (Amico y Schoenlechner, 2016). Afortunadamente, los minerales son termoestables y la extrusión puede reducir los niveles de ácido fítico y taninos condensados en los granos y de esta manera mejorar la absorción de estos minerales (Fellows y col., 2017).

El contenido de minerales obtenido en el amaranto ( $2.78 \pm 0.09$  %) es similar a lo reportado por Álvarez-Jubete y col., (2009) cuyo valor fue de 2.8% pero menor al valor de 4.1% publicado por Corke y col., (2016). Esto puede deberse a que el contenido de minerales de los granos, en general, está influenciado por las características de la zona de producción, técnicas de cultivo (en particular fertilizantes utilizados) y condiciones climáticas (Dyner y col., 2016). Por otra parte, el porcentaje de cenizas de la harina de sorgo nixtamalizada ( $1.32 \pm 0.17$  %) se encuentra dentro de lo reportado en la literatura (1.36-1.75%) (Serna-Saldivar y col., 1998; Sánchez, 2014; Cabrera-Ramírez, 2015). Además, por consiguiente, se obtuvo un mayor porcentaje de cenizas en la botana desarrollada ( $5.55 \pm 0.11$  %) respecto al comercial ( $2.76 \pm 0.16$  %). Lo que demuestra que el amaranto puede ser usado como un ingrediente potencial para fortificar alimentos.

También se cuantificó el contenido de fibra dietética en las diferentes muestras. No se encontraron diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ) en cuanto al contenido de fibra soluble e insoluble en el amaranto extruido y horneado ( $2.80 \pm 0.44$  % y  $19.48 \pm 0.44$  % respectivamente) con respecto al amaranto sin tratamiento ( $3.01 \pm 0.87$ % y  $20.56 \pm 0.87$ %).

El porcentaje de fibra insoluble en amaranto de acuerdo a lo reportado por Chauhan y col., (2015) se encuentra en un rango de 65 a 85%, mientras que la fibra soluble esta alrededor de 17 a 34% de la fibra total; mientras que Ilou y col., (2000) reportan un 3% de fibra soluble. Siendo los resultados del presente proyecto menores lo que probablemente se deba a la diferencia de las condiciones de extrusión realizadas. En el caso del amaranto extruido se pudo observar una reducción mínima de la fibra, esta reducción posiblemente se presenta por la alta presión, la temperatura elevada y la cizalla que se presenta durante la extrusión, fragmentando moléculas más grandes de hidratos complejos de carbono en moléculas más pequeñas que son solubles en agua, al igual los fragmentos de fibra se unen para formar complejos grandes con otros compuestos, así mismo pueden participar en la reacción de Maillard (Ramirez, 2013).

En el caso del sorgo, en el proceso de extrusión y horneado se presentó un aumento en el contenido de fibra soluble ( $2.18 \pm 0.91$  %) e insoluble y ( $17.56 \pm 0.36$  %), mientras que en la harina de sorgo solamente nixtamalizada presentó un valor en fibra soluble e insoluble de  $1.83 \pm 0.51$  % y  $16.16 \pm 0.51$  % respectivamente. Sin embargo, no se presenta una diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) entre ambas muestras. El valor de porcentaje de fibra soluble e insoluble de la harina de sorgo nixtamalizada, fue mayor a lo publicado por Serna-Saldivar y col., (1998) donde se reportó un valor de fibra soluble e insoluble de 1.31 y 14.08% respectivamente, sin embargo, no menciona si el porcentaje es en base al contenido de carbohidratos. Por otro lado, Cabrera-Ramírez (2015) reportó 0.21% para fibra soluble y 17.79% en la insoluble. El porcentaje de fibra soluble e insoluble que se presentó en el sorgo extruido y horneado, es mayor a lo reportado por Llopart (2011) en fibra soluble ( $1.4 \pm 0.38$ %) y fibra insoluble ( $8.51 \pm 0.90$ %).

La fibra dietética también sufre cambios durante el proceso de extrusión. En primer lugar, los cambios propios del almidón y formas resistentes al ataque enzimático, que *in vivo* no podrán ser digeridos y son medidos como fibra dietética. En segundo lugar, la degradación de la fibra dietética a fracciones de bajo peso molecular podría disminuir su contenido y así reducir sus beneficios. En tercer lugar, la degradación de macromoléculas de fibra, al aumentar su solubilidad puede cambiar sus efectos

fisiológicos (Pérez-Navarrete y col., 2006). Como el sorgo es una buena fuente de fibra, principalmente insoluble, podría ayudar a disminuir el tiempo de tránsito y evitar problemas gastrointestinales (Pérez-Navarrete y col., 2006).

El contenido de fibra soluble e insoluble no presentó diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ) en el churro de amaranto-sorgo en comparación con la harina de sorgo y al amaranto, dado que éstos son los principales ingredientes en la formulación del producto.

Es importante mencionar que la fibra soluble del churro amaranto-sorgo no presenta diferencia estadística con el churro comercial ( $p < 0.05$ ) teniéndose valores de  $2.24 \pm 0.15 \%$  y  $2.51 \pm 0.17 \%$  respectivamente. En el caso de la fibra insoluble se observa que si hay una diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) debido a que el churro desarrollado presenta un mayor contenido de fibra insoluble que el comercial ( $17.30 \pm 0.72 \%$  y  $12.12 \pm 1.59\%$  respectivamente).

Es importante mencionar que la botana al tener una mayor cantidad de fibra que el comercial podría considerarse como un alimento funcional, debido a que la fibra ha mostrado ser un componente de la dieta esencial para un estado óptimo de la salud humana. Los estudios científicos sobre los beneficios de alimentos ricos en fibra, han permitido identificar claramente destacados efectos favorables en la salud humana para la prevención y/o reducción del riesgo de enfermedades tales como: hipercolesterolemia y hipertrigliceridemia en plasma sanguíneo, hiperglucemia, enfermedades cardiovasculares, cáncer de colon, disbiosis intestinal y deficiencias del sistema inmune (Matos-Chamorro y Chambilla-Mamami, 2010; Cañas y col., 2011; Mohd y col., 2013; Almeida-Alvarado y col., 2014).

Finalmente, se observaron cambios en el contenido de almidón en amaranto durante el proceso de extrusión y horneado, una disminución de  $66.56 \pm 0.09\%$  con respecto a el amaranto sin extrudir que tuvo un contenido de carbohidratos de  $69.87 \pm 0.76\%$  presentando diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). De acuerdo a lo publicado por Bhat y col., (2015) el amaranto se encuentra entre 48 y 69% de carbohidratos, mientras Llou y col., (2000) reportan 57% de carbohidratos durante el proceso de extrusión del amaranto. Jáuregui y col., (2000) reportan 69.98 y 75.21% respectivamente, mientras que Gearhart (2014) reporto 63%, considerando el contenido de fibra dentro de los

carbohidratos, encontrándose así los valores obtenidos dentro del rango de los reportados anteriormente.

Por otra parte, en el caso del sorgo el contenido de carbohidratos durante el proceso de extrusión y horneado ( $78.76 \pm 0.16$  %) presentó un aumento con respecto a la harina de sorgo sólo nixtamalizada ( $75.54 \pm 0.27\%$ ), existiendo entre éstos una diferencia estadística significativa.

El valor de carbohidratos de la harina de sorgo nixtamalizada, extruida y horneada ( $78.76 \pm 0.16$  %) fue mayor a lo publicado por Ilou y col., (2000) donde se reportan valores entre 68 y 72%, mientras que el porcentaje de carbohidratos de la harina de sorgo nixtamalizada ( $75.54 \pm 0.27\%$ ) se encuentra dentro del rango de 70-90% mencionado por Domanski y col., (1997). Por otra parte, Cabrera-Ramírez (2015) reportó un valor un poco menor ( $70.86 \pm 0.41$  %), sin embargo, en estos estudios se consideró el contenido de fibra dentro de los valores de carbohidratos.

Por otra parte, el churro desarrollado a partir del sorgo y amaranto presenta una mayor cantidad de carbohidratos ( $75.39 \pm 0.39$  %) que el churro comercial ( $66.18 \pm 0.23$  %), observando una diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) entre estas dos muestras. Sin embargo, es importante mencionar que gran parte de estos carbohidratos se componen de fibra dietética.

Las muestras extruidas presentaron un aumento en el contenido de carbohidratos, posiblemente debido a que el principal carbohidrato de sorgo, como en todos los cereales, es el almidón, variando su contenido de acuerdo al genotipo, con valores promedios alrededor del 74% (Domanski y col., 1997).

Así mismo durante el proceso de extrusión ocurren cambios en la estructura micro y macromolecular del almidón, debido a que hay una modificación de la cristalinidad por efecto de la gelatinización y rompimiento de las cadenas de amilosa y amilopectina (HENUFOOD, 2012). Además, sufre una degradación molecular por la temperatura, humedad y velocidad del tornillo del extrusor (Enríquez, 2014).

### 5.6.3 Caracterización nutracéutica

#### 5.6.3.1 Determinación de fenoles totales

Los compuestos fenólicos se pueden encontrar en forma libre los cuales son solubles en solventes orgánicos o también se pueden hallar de forma conjugada, es decir, unidos principalmente a carbohidratos y los cuales son insolubles en solventes orgánicos. Los compuestos fenólicos libres son accesibles a ser absorbidos en el intestino delgado, mientras que los ligados tienen baja bioaccesibilidad y una gran proporción de ellos sólo puede ser metabolizados en el colon (Salazar-López y col., 2018) por lo cual sirven como sustrato de fermentación para la microbiota local. El contenido de fenoles totales puede ser determinado empleando diferentes estándares como equivalentes de ácido gálico, ácido ferúlico, o catequina (Sun y Ho, 2008). En el Cuadro 30 se presentan los resultados de fenoles totales libres y ligados determinados por medio del método Folin Cilcalteu empleando ácido gálico como estándar.

Cuadro 30. Fenoles totales libres y ligados de las muestras analizadas

Muestra	Fenoles totales (mg EAG x10 <sup>-3</sup> / g de muestra)		
	Libres	Ligados	Totales
A	227.86 ± 3.68 <sup>Ab</sup>	7.38 ± 0.30 <sup>Be</sup>	235.23 ± 3.8 <sup>Ab</sup>
AE	149.45 ± 4.42 <sup>Bc</sup>	9.54 ± 0.12 <sup>Cde</sup>	158.99 ± 4.33 <sup>Ac</sup>
S	126.77 ± 12.36 <sup>Ad</sup>	11.44 ± 1.74 <sup>Bcd</sup>	138.21 ± 13.21 <sup>Ad</sup>
SE	87.35 ± 3.85 <sup>Be</sup>	16.42 ± 0.35 <sup>Cb</sup>	103.77 ± 3.63 <sup>Ae</sup>
C	73.83 ± 4.28 <sup>Be</sup>	13.05 ± 0.28 <sup>Cc</sup>	86.88 ± 4.54 <sup>Ae</sup>
CC	442.64 ± 5.54 <sup>Ba</sup>	18.71 ± 0.68 <sup>Ca</sup>	461.35 ± 5.44 <sup>Aa</sup>

Letras minúsculas diferentes entre cada columna representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). Letras mayúsculas diferentes entre cada fila representa diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). Donde A: Amaranito explotado, AE: Amaranito explotado, extruido y horneado, S: Sorgo nixtamalizado, SE: Sorgo nixtamalizado,

extruido y horneado, C: Churro elaborado a base de sorgo y amaranto, CC: Churro comercial a base de maíz y trigo

El contenido de fenoles libres en la muestra de amaranto explotado (A) fue de  $227.86 \pm 3.68 \mu\text{g EAG/g}$  muestra, siendo mayor que los presentados en los ligados ( $7.38 \pm 0.30 \mu\text{g EAG/g}$  muestra). Mismo comportamiento se encontró en la muestra de amaranto que fue extruida y horneada (AE) en donde la cantidad de fenoles libres ( $149.45 \pm 4.42 \mu\text{g EAG/g}$ ) superó a la cantidad ligados presentados ( $9.54 \pm 0.12 \mu\text{g EAG/g}$ ).

De acuerdo a lo reportado por Arguelles-López y col., (2018), el contenido de compuestos fenólicos libres y ligados disminuyen al extruir el amaranto, sin embargo, un comportamiento diferente se presentó en este trabajo en donde posterior al procesamiento térmico, el contenido de fenoles libres disminuyó en ambas muestras (amaranto y sorgo), mientras que el contenido de fenoles ligados incrementó. Caso similar fue reportado por Hu y col., 2018 en donde se apreció un incremento en el contenido de fenoles ligados en el arroz negro y una disminución de los fenoles libres, lo cual se le atribuyó a que la temperatura de extrusión puede incrementar el contenido de compuestos fenólicos ligados debido a la formación de complejos de estos compuestos con proteínas. Por otro lado, Gong y col., (2017) también obtuvieron un incremento en el contenido fenólico ligado en el arroz café lo cual asociaron a que gracias al proceso de extrusión se puede obtener una extracción alcalina más efectiva de compuestos fenólicos debido de la destrucción de la matriz de la pared celular.

De manera general, la cantidad de fenoles totales presentes en A ( $235.23 \pm 3.8 \mu\text{g EAG/g}$ ) fue mayor a lo obtenido en el AE ( $158.99 \pm 4.33 \mu\text{g EAG / g}$  muestra), existiendo entre éstos dos una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), mismo comportamiento fue publicado por Repo y col., (2009) donde el contenido de fenoles en muestras de amaranto mantuvo entre 80.3 y 64.4% de fenoles totales al ser extruido. Esto puede deberse a la descarboxilación de los ácidos fenólicos durante el proceso de extrusión (Márquez-López y López-Martínez, 2019). Los fenólicos son

sustancias que tienen un anillo aromático con uno o más sustituyentes hidroxilo los cuales son inestables al calor a temperaturas mayores a 80°C (Wani y Kumar, 2016).

La cantidad de fenoles libres obtenido en el A ( $227.86 \pm 3.68 \mu\text{g EAG/g}$ ) es menor al valor de  $2.99 \pm 0.29 \text{ mg EAG / g b.s}$ , reportado por Muyonga y col., (2013), al rango de 0.98-1.1 mg EAG/g publicado por Repo y col., (2009), a los valores de 2-4 mg EAG /g descrito por Guzmán y Paredes (1998) y al valor de 2.01–9.10 mg EAG/g mencionado por Dykes y col., (2005). Esta diferencia podría deberse a las diferentes especies de amaranto y a diferentes condiciones de crecimiento y procesamiento. Pero mayor al valor de  $11.94 \pm 0.5 \text{ mg EAG /100 g}$  reportado por Arguelles-López y col., (2018) cuya muestra de amaranto no fue explotado.

En el presente trabajo el contenido de fenoles ligados en el amaranto ( $7.38 \pm 0.30 \mu\text{g EAG/g}$ ) es menor al valor de  $23.8 \pm 0.3 \text{ mg EAG/100 g}$  reportado por Okarter, 2012 y al valor de  $16.11 \pm 0.4 \text{ mg EAG/100 g}$  reportado por Arguelles-López y col., (2018) Por otra parte, para la cantidad de fenoles libres en el AE, Repo y col., (2009) reporta valores entre 0.22 y 0.35 mg EAG/g muestra, siendo muy similar a lo obtenido el presente trabajo ( $149.45 \pm 4.42 \mu\text{g EAG/g}$ ). Las pequeñas diferencias se atribuyen a las condiciones de extrusión empleadas ya que ellos utilizaron una mayor temperatura (180°C) y una mayor velocidad de tornillo (254.5 rpm)

En el caso del sorgo, éste es considerado una fuente rica de compuestos fenólicos, sin embargo, su bioaccesibilidad puede verse afectada por las tecnologías o procesos aplicados antes de su ingesta, lo que puede interferir en su potencial biológico (Salazar-Lopez y col., 2018). La extrusión es un proceso prometedor para la fabricación de alimentos funcionales a base de cereales, ya que puede preservar o aumentar el contenido de compuestos fenólicos (Salazar-Lopez y col., 2018).

En el presente proyecto, la cantidad de fenoles libres en el sorgo nixtamalizado (S) ( $126.77 \pm 12.36 \mu\text{g EAG/g}$  muestra) es estadísticamente mayor ( $p < 0.05$ ) a lo presentado en el sorgo que fue sometido al proceso de extrusión y horneado (SE) ( $87.35 \pm 3.85 \mu\text{g EAG/g}$  muestra). Caso contrario ocurrió con los fenoles ligados, en donde se obtuvo un valor mayor en la muestra extruida y horneada ( $16.42 \pm 0.35 \mu\text{g}$



EAG/ g) con respecto al sólo nixtamalizado ( $11.44 \pm 1.74 \mu\text{g EAG/ g}$  de muestra). Existiendo entre éstos una diferencia estadística ( $p < 0.05$ )

La cantidad de fenoles libres en S ( $126.77 \pm 12.36 \mu\text{g EAG/ g}$  de muestra) es menor al valor de  $2.022 \pm 0.0157 \text{ mg EAG/g}$  publicado por Salazar-Lopez y col., (2016) en donde no se llevó un proceso de nixtamalización. Por otro lado, Salazar y col., (2018) reportan valores de fenoles libres de  $1 \pm 0.0 \text{ mg EAG / g}$  y un valor de fenoles ligados de  $0.8 \pm 0.1 \text{ mg EAG / g}$  mientras que Shen y col., (2018) reportan un contenido de fenoles libres de  $171.40 \pm 4.09 \text{ mg EAG/100g}$  y ligados de  $3.37 \pm 0.57 \text{ mg EAG/100g}$ , siendo todos éstos menores a los obtenidos en el presente trabajo

En el caso del sorgo extruido (SE), Salazar-Lopez y col., (2016) reportan una cantidad de fenoles libres de  $2.4068 \pm 0.1079$  y  $2.1336 \pm 0.0516$  al emplear 20 y 30% de humedad respectivamente y usando una temperatura de extrusión de 60 y 110°C en la primera y segunda zona de calentamiento siendo estos valores mayores al valor de  $87.35 \pm 3.85 \mu\text{g EAG/g}$  obtenido en este trabajo. Awika y col., (2003b) sugieren que podría haber fragmentación de procianidinas durante la cocción por extrusión, lo que podría aumentar la biodisponibilidad (Wojtowicz y col., 2018)

El contenido de fenoles totales libres presentado en el chorro comercial ( $442.64 \pm 5.54 \mu\text{g EAG/g}$ ) es similar al valor de  $48.8 \pm 2.6 \text{ mg EAG/100 g}$  presentado en una botana extruida a base de maíz utilizada como control en un artículo publicado por Wojtowics y col., (2018). Sin embargo, fue un poco menor al valor de  $0.56 \pm 0.07 \text{ mg/g}$  publicado por Limsangoauan y col., (2010) y al valor de  $52.01 \pm 0.77 \text{ mg/100g}$  publicado por Buitimea-Cantua y col., (2016).

Como se observa en el Cuadro 30, el chorro comercial presentó un mayor valor de compuestos fenólicos totales ( $461.35 \pm 5.44 \mu\text{g EAG/g}$ ) con respecto al elaborado ( $86.88 \pm 4.54 \mu\text{g EAG/g}$ ). Esto podría atribuirse a que el chorro comercial está elaborado principalmente a base de maíz y el contenido de fenoles totales presentes en este cereal es mayor a lo que se encuentra en el sorgo blanco. Sun y Ho (2008), calcularon el índice de fenoles totales relativos (%) en diferentes cereales, asignando un valor de 100% al cereal que presentaba un mayor contenido de fenoles totales.

De acuerdo a sus resultados, los valores de índice de contenido fenólico total relativo de mayor a menor es: sorgo marrón, sorgo rojo, sorgo negro, trigo, cebada, avena, trigo sarraceno, arroz, maíz, mijo, sorgo blanco, y centeno respectivamente.

#### 5.6.3.2 Determinación de flavonoides

En el Cuadro 31 se observa que AE presentó un incremento en el contenido de flavonoides ligados ( $45.99 \pm 0.27 \mu\text{g ER/g}$  de muestra) y totales ( $225.39 \pm 2.19 \mu\text{g ER/g}$ ) en comparación con la muestra A cuyos valores fueron de  $45.99 \pm 0.27$  y  $206.37 \pm 0.80 \mu\text{g ER/g}$  respectivamente. Esto podría deberse a que el tratamiento térmico puede desactivar enzimas endógenas evitando así la oxidación enzimática que causa la pérdida del antioxidante en materia prima de origen vegetal (Muyonga y col., 2013). Por otro lado, Chaires- Martínez y col., (2013) comprobaron que, en el caso del Huauzontle, un procesamiento térmico puede ocasionar la disminución del contenido de fenoles totales y a su vez un incremento en el contenido de flavonoides, mismo comportamiento que se puede apreciar en el amaranto.

Muyonga y col., (2013) reporta un contenido de flavonoides en el amaranto explotado de  $0.78 \pm 0.11 \text{ mg}$  equivalente de catequina / g de muestra en base seca, las diferencias obtenidas se deben al estándar empleado. Es importante mencionar, que de acuerdo al estudio publicado por Chaires-Martínez y col., (2013), la concentración de flavonoides obtenidos en los extractos depende tanto del solvente como del tratamiento al que la materia prima se someta. En ese artículo se menciona que se logró obtener un mayor contenido de flavonoides en el Huauzontle sometido a un proceso de explotado y cocción al realizar la extracción a través una mezcla de metanol acidificado (HCl 1.2 M / 50% Metanol / Agua). Por otro lado, al emplear solamente metanol, el contenido de flavonoides en el explotado ( $410 \pm 12 \mu\text{g}$  de Quercetina/g b.s) fue menor que en el crudo ( $470 \pm 10 \mu\text{g}$  de Quercetina/g b.s)

En la muestra S se obtuvo un valor de flavonoides libres de  $160.80 \pm 2.60 \mu\text{g ER/g}$  siendo este valor mayor al  $97.9 \mu\text{g ER/g}$  reportado por González-Zepeda (2014). Por otro lado, Shen y col., (2018) reportan un valor de flavonoides libres de  $11.18 \pm 1.65 \text{ mg ER/100g}$ , un valor de ligados de  $0.54 \pm 0.06 \text{ mg ER/100g}$  y un valor de totales de

11.72 ± 1.69 mg ER/100g, siendo el primero muy similar a lo obtenido (160.80 ± 2.60 µg ER/g) aunque menores al valor de ligados (76.99 ± 1.80 µg ER/g) y totales (237.79 ± 4.25 µg ER/g) obtenidos.

En el caso de la muestra SE, se presentó un contenido de flavonoides libres de 153.21 ± 1.45 µg ER/g siendo similar al valor de 116.5 ± 0.75 µg ER/g reportado por González-Zepeda (2014) en su muestra de sorgo blanco nixtamalizado por extrusión.

El valor de flavonoides totales obtenido en el churro elaborado (217.89 ± 0.335 µg ER/g) fue mayor al obtenido en el comercial (202.61 ± 1.404 µg ER/g), existiendo entre estos dos una diferencia significativa.

Cuadro 31. Contenido de flavonoides de la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado

Muestra	Flavonoides (µg ER/g de muestra)		
	Libres	Ligados	Totales
A	160.37 ± 0.90 <sup>Ba</sup>	45.99 ± 0.27 <sup>Cc</sup>	206.37 ± 0.80 <sup>Ad</sup>
AE	152.43 ± 2.56 <sup>Bb</sup>	72.96 ± 2.96 <sup>Ca</sup>	225.39 ± 2.19 <sup>Ab</sup>
S	160.80 ± 2.60 <sup>Ba</sup>	76.99 ± 1.80 <sup>Ca</sup>	237.79 ± 4.25 <sup>Aa</sup>
SE	153.21 ± 1.45 <sup>Bb</sup>	24.51 ± 1.40 <sup>Cd</sup>	177.72 ± 2.77 <sup>Ae</sup>
C	161.04 ± 2.17 <sup>Ba</sup>	56.85 ± 1.19 <sup>Cb</sup>	217.89 ± 0.335 <sup>Ac</sup>
CC	160.56 ± 1.35 <sup>Ba</sup>	42.05 ± 0.71 <sup>Cc</sup>	202.61 ± 1.404 <sup>Ad</sup>

Letras minúsculas diferentes entre cada columna representa una diferencia significativa (p<0.05). Letras mayúsculas diferentes entre cada fila representa diferencia significativa (p<0.05) Donde A: Amaranto explotado, AE: Amaranto explotado, extruido y horneado, S: Sorgo nixtamalizado, SE: Sorgo nixtamalizado, extruido y horneado, C: Churro elaborado a base de sorgo y amaranto, CC: Churro comercial a base de maíz y trigo

### 5.6.2.3 Determinación de taninos condensados

En el Cuadro 32 se muestra que no existe diferencia significativa entre el contenido de taninos libres, ligados y totales de la muestra de amaranto explotado con respecto a la que fue extruida y horneada.

Akin-Idowu y col., (2017) reportan un valor de taninos libres en el amaranto de  $0.12 \pm 0.003$  g/100g siendo mayor a lo obtenido ( $0.52 \pm 0.03$  mg de (+) catequina / g de muestra), esto puede atribuirse a que el amaranto utilizado en este trabajo es explotado y éste procesamiento térmico permite reducir factores antinutricionales como fitatos, oxalatos y taninos (Njoki y col., 2014). Por otro lado, Lara y col., (2007) y Njoki y col., 2014 reportan un valor de taninos totales de 0.90 mg/100 g y 1 mg /100 g respectivamente para el amaranto explotado siendo éstos mayores a lo obtenido.

Ferreira y Áreas (2010) reportan un valor de taninos de  $1284 \pm 0.52$  mg/100g para amaranto sin explotar, sólo extruido a  $150^{\circ}$  C, siendo éste un valor mayor al obtenido ( $0.49 \pm 0.06$  mg de (+) catequina / g)

Por otro lado, de acuerdo a lo presentado en el Cuadro 32 no existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre el contenido de taninos presentado en S ( $0.48 \pm 0.055$  mg de (+) catequina/ g muestra) con respecto al obtenido en el SE ( $0.48 \pm 0.131$  mg de (+) catequina /g de muestra). Mismo comportamiento y valores similares fueron reportados por Filipović y col., (2003) que reportan un valor de 0.45 y 0.43 respectivamente. Sin embargo, Salazar-Lopez y col., (2018), reporta un valor de taninos libres de  $0.6 \pm 0.0$  mg de (+) catequina / g muestra siendo mayor a lo obtenido en el presente trabajo, esto puede deberse a que no llevaron a cabo un proceso de nixtamalización y de acuerdo a lo reportado por Gaytán-Martínez y col., (2017) el someter los granos de sorgo blanco a un proceso termo-alcálico permite disminuir el contenido de taninos condensados siempre y cuando se emplee una cantidad de cal y un tiempo de cocción óptimos. Por otro lado, González-Zepeda, (2014) publicó un valor de taninos libres de  $3.71 \pm 0.41$  mg de (+) catequina /g para S y un valor de  $5.68 \pm 0.15$  mg de (+) catequina /g para SE, siendo éstos valores mayores a los obtenidos. Asif (2011) reportó un valor de taninos libres de 0.05 mg de (+) catequina

/ g para el sorgo sin extruir y un valor de 0.2 mg de (+) catequina / g para el extruido siendo menores a los obtenidos, lo cual podría deberse a que se usó un extrusor de tornillo simple y no doble como lo reportó Asif, lo que pudo permitir que éste último pudiera incrementar el área de contacto entre los componentes de su formulación y las zonas de calentamiento del extrusor, provocando una mayor pérdida de taninos condensados, otra teoría de la causa de que el obtuviera un menor valor puede ser a que se haya promovido la interacción tanino-proteína.

El contenido de taninos totales obtenido en el churro a base de sorgo y amaranto fue mayor ( $0.70 \pm 0.128$  mg de (+) catequina /g) a lo obtenido en el churro comercial  $0.44 \pm 0.041$  mg de (+) catequina /g). Es importante destacar, que Lara y col., (2007) reporta un valor de taninos totales 0.85 en cereales de desayuno y 0.62 en barras a base de amaranto encontrándose el churro sorgo-amaranto en este rango.

Cuadro 32. Contenido de taninos de la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado

Muestra	Taninos condensados (mg de (+) catequina / g de muestra)		
	Libres	Ligados	Totales
A	$0.52 \pm 0.03$ <sup>Aab</sup>	$0.05 \pm 0.015$ <sup>Bbc</sup>	$0.57 \pm 0.020$ <sup>Aab</sup>
AE	$0.49 \pm 0.06$ <sup>Aab</sup>	$0.09 \pm 0.017$ <sup>Bab</sup>	$0.58 \pm 0.067$ <sup>Aab</sup>
S	$0.42 \pm 0.04$ <sup>Ab</sup>	$0.05 \pm 0.02$ <sup>Bbc</sup>	$0.48 \pm 0.055$ <sup>Aab</sup>
SE	$0.43 \pm 0.13$ <sup>Aab</sup>	$0.05 \pm 0.003$ <sup>Bbc</sup>	$0.48 \pm 0.131$ <sup>Aab</sup>
C	$0.65 \pm 0.13$ <sup>Aa</sup>	$0.05 \pm 0.003$ <sup>Bc</sup>	$0.70 \pm 0.128$ <sup>Aa</sup>
CC	$0.32 \pm 0.03$ <sup>Bb</sup>	$0.12 \pm 0.019$ <sup>Ca</sup>	$0.44 \pm 0.041$ <sup>Ab</sup>

Letras minúsculas diferentes entre cada columna representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). Letras mayúsculas diferentes entre cada fila representa diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) Donde A: Amaranto explotado, AE: Amaranto explotado, extruido y horneado, S: Sorgo nixtamalizado, SE: Sorgo nixtamalizado, extruido y horneado, C: Churro elaborado a base de sorgo y amaranto, CC: Churro comercial a base de maíz y trigo

#### 5.6.3.4 Determinación de la capacidad antioxidante

La actividad antioxidante de los cereales ha sido subestimada durante mucho tiempo, dado que solamente se cuantificaban los antioxidantes libres, pero aproximadamente el 90% de ellos están ligados. Estos antioxidantes ligados tienen la posible capacidad de resistir la digestión gástrica e intestinal por lo que podrían ser liberados en el intestino grueso ejerciendo una acción protectora (Aparicio y col., 2015) como evitar el daño oxidativo, protección adicional frente a diversas enfermedades crónicas, comúnmente presentadas en personas con exceso de peso y demás (Vitaglione y col., 2015). Se ha observado que la actividad antioxidante de los cereales está ligada a la cantidad de compuestos fenólicos presentes.

##### 5.6.3.4.1 Método ABTS

En el Cuadro 33 se muestran los resultados de capacidad antioxidante por el método ABTS. Se observa una disminución en el valor de la capacidad antioxidante en AE ( $2120.73 \pm 32.27 \mu\text{mol ET/g}$  muestra) con respecto al que no fue procesado ( $4054.51 \pm 373.45 \mu\text{mol ET/g}$  muestra). Esto puede deberse a que el amaranto ya viene de un proceso térmico de explotado, por lo tanto, al aplicar un segundo tratamiento térmico (extrusión), se ve esta reducción de capacidad antioxidante. Caso contrario se presentó en las muestras de sorgo donde se obtuvo un mayor valor en SE ( $2423.24 \pm 65.00 \mu\text{mol ET/g}$  muestra) con respecto a la muestra de S ( $1694.72 \pm 124.24 \mu\text{mol ET/g}$  muestra).

El valor de capacidad antioxidante de fitoquímicos libres en A fue de  $3219.78 \pm 376.36 \mu\text{mol ET/g}$  siendo mayor a los valores de  $179.2 \pm 3.98 \text{ mmol ET/100g}$  publicado por Akin-Idowu col., (2017) y al valor de  $2,134 \pm 96 \mu\text{mol ET/100g}$  reportado por Arguelles-López y col., (2018). Misma tendencia se observó en la capacidad antioxidante ABTS de los fitoquímicos ligados, donde fue mayor el obtenido ( $834.73 \pm 2.92 \mu\text{mol ET/g}$ ) con respecto al valor de  $2,768 \pm 111 \mu\text{mol ET/100g}$  publicado por Arguelles-López y col., (2018). Las diferencias encontradas en éste podrían deberse a que éste utilizó amaranto entero y no explotado, además del método de determinación empleado.

Por otro lado, este mismo autor reporta para el amaranto extruido una capacidad antioxidante de fitoquímicos libres y ligados de  $1,675 \pm 73$  y  $3,765 \pm 125$   $\mu\text{mol ET/g}$  respectivamente, siendo menor a lo obtenido ( $1339.311 \pm 34.55$  y  $781.42 \pm 3.15$   $\mu\text{mol ET/g}$ ).

Además, en el caso del sorgo, se presentó un incremento de la capacidad antioxidante total al someter la materia prima bajo el proceso de extrusión, pasando de  $1694.72 \pm 124.24$   $\mu\text{mol ET/g}$  a  $2423.24 \pm 65.00$   $\mu\text{mol ET/g}$  a pesar de que el contenido de fenoles totales disminuyó al llevarse a cabo la extrusión (Cuadro 30). Esto puede deberse a que a pesar de que los compuestos fenólicos son considerados el principal grupo fitoquímico que contribuye a la actividad antioxidante (Zenil y col., 2016), durante la cocción por extrusión se producen cambios en estos componentes antioxidantes naturales, favoreciéndose su degradación (Ilo y col., 2000). Sin embargo, Ruiz-Roca (2009) menciona que a pesar de que durante el procesamiento de alimentos ocurra esta pérdida parcial de compuestos naturales con actividad antioxidante, estas propiedades podrían mantenerse o incluso mejorarse debido a la formación de nuevos compuestos como los productos de la reacción Maillard, los cuales son capaces de neutralizar la actividad de radicales libres como DPPH y ABTS.

Cuadro 33. Capacidad antioxidante ABTS de las muestras analizadas

Muestra	ABTS ( $\mu\text{mol ET/g}$ muestra)		
	Libres	Ligados	Totales
A	$3219.78 \pm 376.36$ <sup>Bb</sup>	$834.73 \pm 2.92$ <sup>Cbc</sup>	$4054.51 \pm 373.45$ <sup>Ab</sup>
AE	$1339.311 \pm 34.55$ <sup>Bd</sup>	$781.42 \pm 3.15$ <sup>Cc</sup>	$2120.73 \pm 32.27$ <sup>Ade</sup>
S	$741.98 \pm 23$ <sup>Be</sup>	$952.741 \pm 103.48$ <sup>Bab</sup>	$1694.72 \pm 124.24$ <sup>Ae</sup>
SE	$1413.12 \pm 53.83$ <sup>Bd</sup>	$1010.118 \pm 24.43$ <sup>Ca</sup>	$2423.24 \pm 65.00$ <sup>Ad</sup>
C	$2398.32 \pm 263.82$ <sup>Bc</sup>	$1039.363 \pm 15.49$ <sup>Ca</sup>	$3437.68 \pm 254.14$ <sup>Ac</sup>
CC	$3807.47 \pm 190.12$ <sup>Ba</sup>	$969.97 \pm 26.92$ <sup>Ca</sup>	$4777.44 \pm 207.41$ <sup>Aa</sup>

Letras minúsculas diferentes entre cada columna representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). Letras mayúsculas diferentes entre cada fila representa

diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). Donde A: Amaranto explotado, AE: Amaranto explotado, extruido y horneado, S: Sorgo nixtamalizado, SE: Sorgo nixtamalizado, extruido y horneado, C: Churro elaborado a base de sorgo y amaranto, CC: Churro comercial a base de maíz y trigo

Por otro lado, el valor de capacidad antioxidante fue mayor en el churro comercial ( $4777.44 \pm 207.41 \mu\text{mol ET/g}$ ) que en el elaborado ( $3437.68 \pm 254.14 \mu\text{mol ET/g}$ ) lo que, al igual que el contenido de fenoles totales, podría atribuirse a la materia prima con la que fueron elaborado. Sun y Ho (2008) reportan un mayor índice de actividad antioxidante relativa en el maíz mayor al 20% mientras que en el sorgo blanco este valor es aproximadamente del 10%.

Como se observa en la (Figura 51) los mayores valores en capacidad antioxidante en ligados se presentó en las muestras de sorgo y la botana elaborada con 89.63, 92.89% y 93.31% de inhibición, mientras que en libres, los mayores valores se apreciaron en las muestra de la botana comercial y el amaranto (68 y 57.60%).

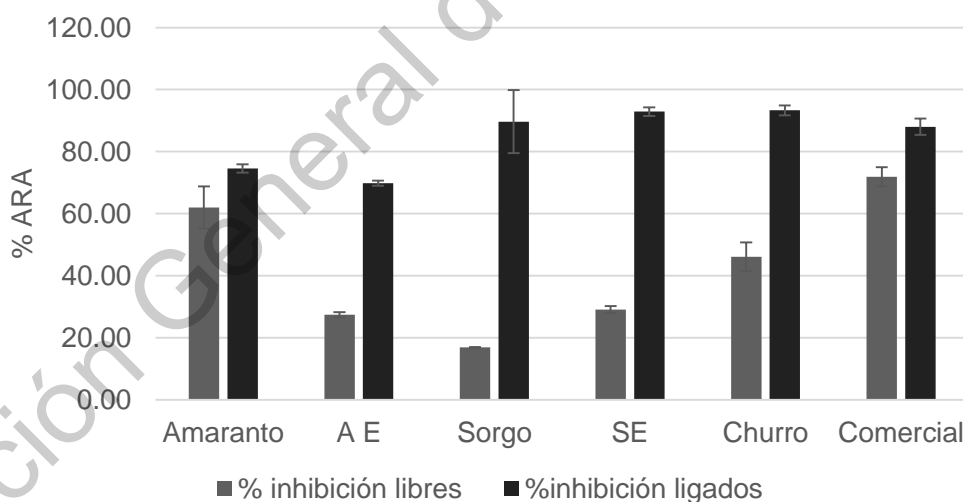


Figura 51. Porcentaje de inhibición de las muestras analizadas (ABTS)

#### 5.6.2.4.2 Método DPPH

Existe muchos métodos para medir la capacidad antioxidante de una especie o sustancia, además del ABTS, otro método muy usado se basa en la estabilidad del radical 1,1- difenil-2-picrilhidrazil (DPPH) la cual se atribuye a la deslocalización del



electrón desapareado, esta deslocalización también le otorga una coloración violeta caracterizada por una banda de absorción, en solución etanólica, centrada alrededor de 520 nm. Cuando una disolución de DPPH entra en contacto con una sustancia que puede donar un átomo de hidrógeno u otra especie radical (R\*) se produce la forma reducida DPPH-H ó DPPH-R con la consecuente pérdida del color y por lo tanto la pérdida de la absorbancia (Molyneux, 2004).

La actividad antioxidante de cada muestra expresada como concentración en  $\mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra, se observa en el Cuadro 34.

Cuadro 34. Capacidad antioxidante DPPH de la botana comercial y elaborada, en la materia prima con y sin proceso de extrusión y horneado

DPPH ( $\mu\text{mol}$ de Trolox /g de muestra)			
Muestra	Libres	Ligados	Totales
A	5008.74 $\pm$ 223.07 <sup>aB</sup>	1138.44 $\pm$ 43.37 <sup>bC</sup>	6118.86 $\pm$ 121.89 <sup>bA</sup>
AE	2435.48 $\pm$ 84.50 <sup>bB</sup>	1030.38 $\pm$ 23.68 <sup>cC</sup>	3465.87 $\pm$ 107.95 <sup>cA</sup>
S	2309.09 $\pm$ 126.03 <sup>bB</sup>	1225.09 $\pm$ 24.99 <sup>aC</sup>	3534.18 $\pm$ 150.90 <sup>cA</sup>
SE	2293.42 $\pm$ 80.88 <sup>bB</sup>	1266.34 $\pm$ 7.26 <sup>aC</sup>	3559.76 $\pm$ 87.06 <sup>cA</sup>
C	2492.64 $\pm$ 108.76 <sup>bB</sup>	1282.64 $\pm$ 2.50 <sup>aC</sup>	3775.28 $\pm$ 107.36 <sup>cA</sup>
CC	5265.90 $\pm$ 211.85 <sup>aB</sup>	1275.90 $\pm$ 30.08 <sup>aC</sup>	6541.80 $\pm$ 241.54 <sup>aA</sup>

Letras minúsculas diferentes entre cada columna representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). Letras mayúsculas diferentes entre cada fila representa diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) Donde A: Amaranto explotado, AE: Amaranto explotado, extruido y horneado, S: Sorgo nixtamalizado, SE: Sorgo nixtamalizado, extruido y horneado, C: Churro elaborado a base de sorgo y amaranto, CC: Churro comercial a base de maíz y trigo

Los resultados de la actividad antioxidante en los compuestos fenólicos totales indican que todos los extractos fueron capaces de atrapar radicales DPPH de una manera dependiente de la muestra. La actividad antioxidante de cada muestra expresada como concentración en  $\mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra, se observa en el

Cuadro 34. El amaranto extruido presentó una de las mayores actividades antioxidantes con una concentración de  $6118.86 \pm 121.89 \mu\text{M}$  de Trolox/ g de muestra, mientras que el amaranto, sorgo, sorgo extruido y churro mostraron una actividad antioxidante con una concentración en un rango de 3465 a 3775  $\mu\text{M}$  de Trolox/ g de muestras sin presentar diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). El churro comercial presentó la más alta capacidad de atrapar radicales DPPH con una concentración de  $6541.80 \pm 241.54 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra, cabe resaltar que entre el churro y churro comercial sí existe diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). Lo que podría atribuirse a la capacidad antioxidante proveniente de la materia prima con la que fue elaborado.

De acuerdo a resultados reportados por otros autores para la capacidad antioxidantes en compuestos antioxidantes total por el método de DPPH en harina de sorgo Herald y col., en el 2012 reporta  $181.94 \pm 6.17 \mu\text{M}$  de Trolox /ml de muestra, presentando una menor capacidad antioxidantes en comparación con la desarrollada cuyo valor es de  $3534.18 \pm 150.90 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra. Mientras Cardenas y col., en el 2012 reportan para la harina de amaranto  $32.82 \pm 1.33 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra y para el amaranto extruido  $26.14 \pm 1.53 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra, los resultados reportados muestran una menor capacidad antioxidantes en comparación con los obtenidos  $6118.86 \pm 121.89$  y  $3465.87 \pm 107.95 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra respectivamente.

Por otra parte, la capacidad de antioxidantes en el amaranto se puede deber al proceso de extrusión por el calor que es aplicado a la muestra. Autores como Fares y col., (2010) reportan que la cocción del amaranto puede ayudar a mantener o a liberar los compuestos antioxidantes de éste los cuales permitirán contribuir a la capacidad antioxidante, así mismo Aravind y col., (2012) reportan que el aumento en la capacidad antioxidante podría atribuirse a que el ensayo DPPH puede medir diferentes antioxidantes como los esteroides y vitamina E, los cuales se encuentran presentes en el amaranto y contribuyen a la capacidad antioxidante de las pastas cocidas (Kaur y col., 2010).

Por otra parte, Repo y col., en el 2009 reportan una disminución de la actividad antioxidantes del amaranto por el método de la extrusión, presentando una actividad sin extrudir de  $410.19 \pm 0.01 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra a  $180.32 \pm 0.00 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra con el proceso de extrusión, observándose el mismo efecto durante el proceso de extrusión con el amaranto obteniendo una reducción de  $6118.86 \pm 121.89$  a  $3465.87 \pm 107.95 \mu\text{M}$  de Trolox /g de muestra de amaranto.

En la Figura 52 se observa un mayor porcentaje en los compuestos ligados principalmente en el sorgo extruido con un 95.65% de inhibición del radicales de DPPH, sin embargo, en el amaranto extruido se observó el menor porcentaje de inhibición el cual fue del 77.78%. En cuanto a los compuestos libres, el porcentaje de inhibición fue menor del 50% de inhibición sólo en el caso del amaranto y del churro comercial que presentaron el 78.81 y 82.02% de inhibición, cabe destacar que durante la prueba de ABTS sucede lo mismo, solo el amaranto y el churro comercial lograron más del 50% de inhibición el cual fue de 57.60 y 68.01% mientras que, en el amaranto extruido, sorgo y sorgo extruido y el churro elaborado presentaron menos del 50% de inhibición. Observándose un mejor porcentaje de inhibición con la prueba de DPPH esto puede deber a que el ABTS es un compuesto más reactivo en comparación al DPPH.

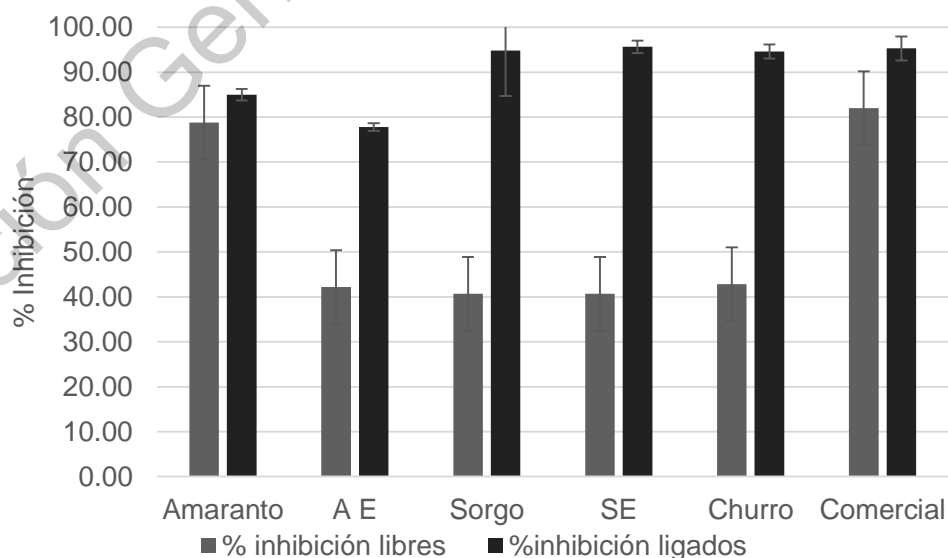


Figura 52. Porcentaje de inhibición de las muestras analizadas (DPPH)

#### 5.6.2.5 Almidón resistente

El almidón resistente no es digerido en el intestino delgado, sino que pasa hacia el intestino grueso en donde actúa como fibra dietética prebiótica alimentando a diversas bacterias, las cuales permiten producir ácidos grasos de cadena corta (butírico, propiónico y acético) lo que permite la generación de energía, recubre la pared intestinal y el tejido muscular (Rodríguez-Vidal., 2017), es por esto que el almidón resistente (AR) se puede utilizar para mejorar el contenido de fibra de los alimentos (Fuentes-Zaragoza y col., 2010) adquiriendo una gran importancia en la nutrición (Jiménez y col., 2011).

De acuerdo a lo reportado en el Cuadro 35, el porcentaje de almidón resistente (AR) en el amaranto aumentó casi el doble al someterse al proceso de extrusión y horneado (AE) ( $1.675 \pm 0.132\%$ ) en comparación con el amaranto sin extrudir (A) ( $0.773 \pm 0.087\%$ ) existiendo entre estos dos una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ). El mecanismo por el cual la extrusión incrementa la cantidad de AR es debido a las altas condiciones de cizallamiento, que causan la despolimeración de la molécula de almidón produciendo cadenas lineales que tienen más posibilidades de retrogradarse en almidón resistente tipo 3 (Dupuis y col., 2014). Por otro lado, el contenido de almidón resistente también es influenciado positivamente por la baja o alta temperatura ( $102^\circ\text{C} <T> 138^\circ\text{C}$ ). Además, aunque se considera que el valor de humedad de la muestra no tiene tanta influencia sobre la formación de este tipo de almidón, el utilizar velocidades de tornillo bajas sí, ya que esto incrementa el tiempo de exposición del almidón en el extrusor y por consiguiente la cantidad de degradación que puede ocurrir (Dupuis y col., 2014). También es importante mencionar que la fusión del almidón durante la cocción por extrusión destruye las dobles hélices de amilopectina por lo que algunos lípidos libres pueden inclusionarse y formar un complejo lípido-amilosa (Jafari y col., 2017) como se había mencionado en la sección 5.6.2.

El valor de almidón resistente en A ( $0.773 \pm 0.087$  g/100g) es un poco mayor al valor de  $0.50 \pm 0.02$  g/100 g publicado por Capriles y col., (2008) y el valor de  $0.51$  g/100g

reportado por Lara y col., (2007). Pero menor al valor de 0.12% reportado por Repo y col., (2009) para el amaranto crudo. En el caso de AE se obtuvo un valor mayor al doble ( $1.675 \pm 0.132$  g/100g) en comparación al valor de  $0.66 \pm 0.05$  g/100g reportado por Capriles y col., (2008).

Por otra parte, el porcentaje de almidón resistente en la harina de sorgo únicamente nixtamalizada (S) ( $1.754 \pm 0.111$  g/100 g) no presentó diferencia estadística con respecto a la harina de sorgo nixtamalizada, extruida y horneada (SE) ( $1.564 \pm 0.048$  g/100g).

Los resultados sobre el impacto de la extrusión en el contenido de AR depende de gran medida del grado y condiciones de procesamiento del alimento (Gómez-López, 2013). Algunos estudios reportan una disminución en el contenido de AR (o aumento de la digestibilidad) atribuido a la destrucción de la estructura granular (Parchure y Kulkani, 1997; Gómez-López, 2013) mientras que otros reportan el incremento de éste debido a la formación de AR tipo 3 y 5 (Alsaffar y col., 2011).

El contenido de amilosa presente en los cereales juega un papel importante en la formación de AR. De forma general, los cereales con mayor contenido de amilosa pueden presentar una digestibilidad de almidón más baja y niveles más altos de almidón resistente. Sin embargo, en el grano de sorgo, otros factores, como la interacción almidón-proteína y el efecto inhibidor enzimático de los polifenoles de sorgo también pueden afectar el contenido de este ingrediente funcional más allá al efecto relacionado con los niveles de amilosa presente (Khan y col., 2013).

Durante la extrusión, las altas temperaturas, la presión, la fuerza de corte y el contenido de agua de la mezcla alteran considerablemente las características fisicoquímicas de la amilosa y la amilopectina, lo que puede provocar la pérdida de cristalinidad, gelatinización irreversible, fusión, fragmentación molecular y retrogradación (Ramos-Díaz, 2015).

De acuerdo al esquema propuesto por Gómez y Aguilera (1984), el almidón crudo puede dañarse mecánicamente como consecuencia de la fuerza de cizalla que, junto con el calor y la humedad, puede conducir a su gelatinización (pérdida de

birrefringencia) provocando la formación de polímeros libres, almidón dextrinizado y oligosacáridos. Sin embargo, esto es sólo una idea de lo que podría suceder ya que este modelo no contempla la formación de estructuras de vítreas ni formación de complejos después de la extrusión (Ramos-Díaz, 2015).

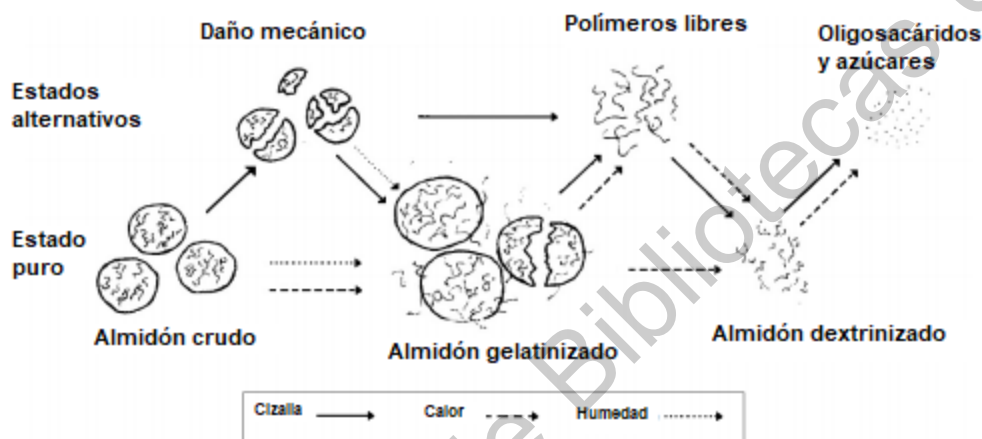


Figura 53. Modelo sobre la degradación de almidón producida durante la extrusión (Gómez y Aguilera, 1984)

De acuerdo a lo reportado por Khan y col., (2013) la harina proveniente del grano de sorgo blanco presentó un valor de  $2.21 \pm 0.06$  g/100 g, un poco mayor a lo obtenido en el presente trabajo ( $1.754 \pm 0.111$  g/100 g). Sin embargo, esto puede deberse a que en el presente trabajo se llevó a cabo un proceso de nixtamalización .

El valor obtenido de la harina de SE ( $1.564 \pm 0.048$  g/100g) es similar a lo calculado por De Castro A. (2006) en donde se llevó a cabo una botana de tercera generación a base de sorgo blanco cuyo valor fue de 1.3 g/ 100g, es importante mencionar que las diferencias entre ambos pueden deberse a las condiciones de extrusión y de horneado empleadas, ya que mencionan que se empleó una temperatura de  $162^{\circ}\text{C}$ , una velocidad de tornillo de 341 rpm, así como un tiempo de horneado de  $100^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos, sin mencionar que en esa muestra no se llevó un proceso de nixtamalización previo.

Los valores de AR en productos a base de cereales están entre 0.1-3.6 g/100g siendo el maíz el que tiene el mayor valor (Alsaffar, 2011). En el caso de las botanas evaluadas, el valor de almidón resistente fue casi el doble en el churro de sorgo y amaranto desarrollado ( $1.123 \pm 0.080$  g/100g) con respecto al churro comercial ( $0.594 \pm 0.146\%$ ) existiendo una diferencia significativa entre ambos. Este resultado es beneficioso ya que el AR se ha relacionado con la reducción en el consumo de calorías y el índice glicémico, estimulación de la microflora intestinal benéfica y prevención de algunas enfermedades cardiovasculares (Jiménez y col., 2011).

Cuadro 35. Resultados de almidón resistente

Muestra	AR (g/100 g)
A	$0.773 \pm 0.087^{bc}$
AE	$1.675 \pm 0.132^a$
S	$1.754 \pm 0.111^a$
SE	$1.564 \pm 0.048^a$
C	$1.123 \pm 0.080^b$
CC	$0.594 \pm 0.146^c$

Los resultados de almidón resistente se presentan en base seca. Letras minúsculas diferentes entre cada columna representa una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) para la prueba de Tukey. Donde A: Amaranto explotado, AE: Amaranto explotado, extruido y horneado, S: Sorgo nixtamalizado, SE: Sorgo nixtamalizado, extruido y horneado, C: Churro elaborado a base de sorgo y amaranto, CC: Churro comercial a base de maíz y trigo

## 6. CONCLUSIONES

El aumento en el contenido de sorgo, así como la disminución del tamaño de partícula del amaranto, incrementa la dureza de la botana, mientras que el aumentar el porcentaje de emulsificante y la proporción de agua en la formulación disminuyen esta propiedad. A pesar de que el adicionar un agente leudante en la formulación genera un incremento en la dureza, también genera una mayor crujencia en la

botana. El emplear chile espolvoreado y llevar un tiempo de horneado superior a 20 minutos deteriora las propiedades sensoriales de la botana.

De acuerdo a los resultados del análisis sensorial, la botana con mayor aceptación fue la que llevó un tiempo de horneado de 15 minutos, encontrándose en un “me gusta” y en un “probablemente sí lo compraría”.

El churro desarrollado presentó un mayor contenido de proteína ( $13.81 \pm 0.29\%$ ) con respecto al churro comercial ( $9.05 \pm 0.24$ ), casi el doble de contenido de cenizas ( $5.55 \pm 0.11$  y  $2.76 \pm 0.16 \%$  respectivamente) y un mayor contenido de fibra insoluble ( $17.30 \pm 0.72$  y  $12.12 \pm 1.59$  respectivamente). En cuanto a la fibra soluble no se presentaron diferencias significativa en ambas botanas. Sin embargo, en el contenido de lípidos presentes, el churro desarrollado presentó 10 veces menos grasa que el comercial ( $2.70 \pm 0.06$  y  $20.65 \pm 0.28 \%$ ).

En cuanto al contenido de fenoles y capacidad antioxidante, el churro comercial presentó valores mayores que el elaborado, lo que podría deberse a la materia prima con la que fue elaborado.

El proceso de extrusión incrementó el porcentaje de almidón resistente en el amaranto mientras que en el sorgo no existió diferencia significativa en este atributo. Sin embargo, es importante destacar que, en el producto final el valor de almidón resistente fue mayor en la botana desarrollada que en la comercial.



## 7. REFERENCIAS

**AACC** Report. The definition of dietary Fiber. *Cereal Foods World*. **2001**; 46(3), 112–126.

**Adedeji** A, Joseph M, Platiner B, Alavi S. Physicochemical and functional properties of extruded sorghum-based bean analog. *Journal of Food Process Engineering* **2016**; 86: 2477-2484.

**Aguayo-Rojas** J, Mora-Rochín S, Cuevas-Rodríguez EO, Serna-Saldívar SO, Gutierrez-Uribe JA, Reyes-Moreno C y Milán-Carrillo J. Phytochemicals and antioxidant capacity of tortillas obtained after limecooking extrusion process of whole pigmented mexican maize. *Plant Foods for Human Nutrition* **2012**; 67: 178-185.

**Akin-Idowu** P, Ademoyegun O, Olagunju Y, Aduloju A, Adebo U. Phytochemical Content and Antioxidant Activity of Five Grain Amaranth Species *Food Sci Tech*; **2017**; 5: 249-255.

**Almeida-Alvarado**, S.; T. Aguilar-López; D. Hervert-Hernández. La fibra y sus beneficios a la salud. *Anales Venezolanos de Nutrición*; **2014**; 27-73,76.

**Alsaffar** A. Effect of food processing on the resistant starch content of cereal and cereal products. *Food Sci Tech* **2011**; 46: 455-462.

**Alssafar** A. Effect of food processing on the resistant starch content of cereals and cereal product. *IFST* **2010**; 46: 455-462.

**Alvarez-Jubete** L, Wijngaard H, Arendt E.K, Gallagher E. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chem* **2010**; 119: 770–778.

**Amico** S y Schoenlechner R. Gluten-free ancient grains. Amaranth: Its unique nutritional and health-promoting attributes. Viena. *El Sevier*, **2016**: 131-159.

**Aparicio** A, Ortega RM, Requejo AM. Guías en alimentación: consumo aconsejado de alimentos. *Nutriguía. Manual de Nutrición Clínica*. Editorial Médica Panamericana, Madrid, **2015**: 27-42.

**Aravind N**, Sissons M, Egan N, Fellows C. Effect of insoluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti. *Food Chemistry* **2012**; 130: 299-309.

**Areas JAG**, Meneces C, Soares R. Amaranth. Brazuk: Elsevier/Academic Press, **2016**: 135-141.

**Arguelles-López O**, Reyes- Moreno C, Gutiérrez-Dorado R. Functional beverages elaborated from amaranth and chia flours processed by germination and extrusion. *Biocencia* **2018**; 20: 135-145.

**Asif M**. Chemical and physical properties of breakfast cereals and snacks made from specialty sorghums and sorghum bran using twin screw extruder. *Food Sci Tech* **2011**: 8-145.

**Awika J**, Rooney L. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*. **2004**; 65:1199–1221.

**Awika**, J. M., Rooney, L. W., Wu, X., Prior, R. L., & CisnerosZevallos, L. (2003b).

**Ayala**, G. A. V, Rivas-Valencia P, Cortés-Espinoza L, De la O Olán M., Escobedo-López D. y Espitia-Rangel E. La rentabilidad del cultivo de Amarantho (*Amaranthus spp.*) en la región centro de México, *Ciencia ergo-sum*, **2014**: 47-54.

**Bantitlan M**, Roy AD, Rao P. Global Sorghum Production Scenario. Bangladesh: Icrisat, **2001**: 24.

**Belton PS**, Delgadillo I, Halford NG, Shewry PR. Kafirin structure and functionality. *J Cereal Sci* **2006**; 44: 272–86.

**Belton PS**, Delgadillo I, Halford NG, Shewry PR. Kafirin structure and functionality. *J Cereal Sci* **2006**; 44: 272-286.

**Beltran M**, Marcilla A. Tecnología de polímeros: Proceso y propiedades. España: Universidad de Alicante, **2012**:102-104.

**Bhat**, A., Satpathy, G., Gupta, R.K. Evaluation of Nutraceutical properties of *Amaranthus hypochondriacus* L. grains and formulation of value added cookies. *J. Pharmacogn. Phytochem.* **2015**; 3, 51–54.

**Boatella J.** Química y Bioquímica de los alimentos II. Edición Universitat de Barcelona **2004**; 84: 475-2838-3.

**Boucher F.** Tecnología alimentaria y agroindustrial. Bogotá. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. **1991**: 91.

**Boucher F.** Tecnología alimentaria y agroindustrial. Bogotá. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. **1991**: 91.

**Box J.** Puntuario de la agricultura. Mundi-Prensa. Tercera edición. España. Editorial Aedos, **2005**: 4.

**Brenan MA, Derbyshire E, Tiwari BK, Brennan CS.** Ready-to-eat snack products: the role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. International Journal of Food Science and Technology. **2012**; 48:893-894.

**Bressani R.** Amaranth. Encyclopedia of Food Sciences and nutrition. Oxford: Elsevier/Academic Press, **2003**: 66–173.

**Bucher T, Collins C, Diem S, Siegrist M.** Adolescents' perception of the healthiness of snack. FQP **2016**; 50: 94-101.

**Burda S y Oleszek W.** Antioxidant and antiradical activities of flavonoids. J Agric Food Chem **2001**; 49: 524-525.

**Cabrera-Ramírez AH.** Efecto de la cocción térmico-alcalina sobre los factores antinutricios y nutricios presentes en dos variedades de sorgo (*Sorghum bicolor L Moench*). Tesis para obtener el grado de maestro en tecnología avanzada. Querétaro. **2015**: 40-76.

**Cabrera-Ramírez AH.** Efecto de la cocción térmico-alcalina sobre los factores antinutricios y nutricios presentes en dos variedades de sorgo (*Sorghum bicolor L Moench*). Tesis para obtener el grado de maestro en tecnología avanzada. Querétaro. **2015**: 40-76.

**Caldas C, Rincón LM.** Oportunidades comerciales alimentos en México Bogotá: Cámara de comercio de Bogota, **2010**:6, 7, 14.

**Camargo** M, Alves dos Santos C, Martins A, Soares O. Vessoni TC, Penna. Ohmic heating-a review. Trends in Food Science and technology **2010**; 21:436-437.

**Cañas**, Z.; A. Restrepo; M. Cortés. Vegetable products as source of dietary fiber in the food industry: A Review. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín **2011**; 64: 6023-6035.

**Capriles** V, Coelho A, Guerra-Matías A, Áreas J. Effects of processing methods on amaranth starch digestibility and predicted glycemic index. JFS **2008**; 73: 160-164.

**Cardador-Martínez** A, Loarca-Piña G, Oomah BD. Antioxidant activity in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). J. Agric. Food Chem. **2002**; 50: 6975–6980.

**Cardenas** A, **Mendoza** S, **Trust** B, **Loarca** G, **Nieto** J, **Castaño** E. Composición Química, características de calidad y actividad antioxidante de pasta enriquecida con harina de amaranto y hoja de amaranto deshidratada, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias y Tecnología de Alimentos, Universidad Autónoma de Querétaro (PROPAC) **2012**.

**Casanueva** E., Kaufer-Horwitz M., Pérez-Lizaur AB., Arroyo P. M. 2008. Nutriología Médica. Tercera edición. Bogotá: Editorial Panamericana, **2008**: 483.

**CENTA**, Centro nacional de tecnología Agropecuaria y Forestal. Guía Técnica del Sorgo (*Sorghum Bicolor* L. Moench), La libertad, El salvador; 2017: 8-29

**Chaires- Martínez** L, Pérez MA, Cantor AI, Cruz F, Jimenez HA. Total Phenolic Content and Antioxidant Capacity of Germinated, Popped, and Cooked Huauzontle (*Chenopodium berlandieri* spp. *nuttalliae*) Seeds. Cereal Chem **2013**; 90: 263-268.

**Chauhan**, A., Saxena, D.C., Singh, S., Total dietary fibre and antioxidant activity of gluten free cookies made from raw and germinated amaranth (*Amaranthus* spp.) flour. LWT Food Sci. Technol. **2015**; 63, 939–945.

**Chávez** D, Ascheri J, Carvalho C, Godoy R, Pacheco S. Sorghum and roasted coffee blend as a novel extruded product: Bioactive compounds and antioxidant capacity. J Func Foods **2017**; 29: 93-103.

**Chiquito**, A., Cobielles C., Montes-N., Pecina V., Anaya J. Kafirins, key proteins to improve digestibility and proteic quality of sorghum grain. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* **2011**; 2.

**Chiquito-Almanza** E, Cobielles,. Montes N, Pecina V, Anaya J. Kafirinas, proteínas clave para conferir digestibilidad y calidad proteica al grano de sorgo. *RMCA* **2011**; 2: 934.

**Choudhury**, S.M, Tan T.M, Bloom S.R. Gastrointestinal hormones and their role in obesity. *Curr. Opin.Endocrinol. Diabetes Obes* **2016**; 23: 18–22.

**Ciudad-Mulero** M, Fernández-Ruiz, Matallana-González MC, Morales P. Dietary fiber sources and human benefits: The case study of cereal and pseudocereals. Madrid: *Advances in Food and Nutrition Research* **2019**: 1-51.

**Colección FAO**. Alimentación y nutrición humana. Roma: Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, **1995**: vol. 27: 2, 116.

**Contreras** J., Caracterización de harina de maíz instantánea obtenida por calentamiento óhmico. Tesis de maestría. Santiago de Querétaro. Centro de Investigación en Ciencias Aplicadas Y tecnología avanzada. **2009**:1-234.

**Corke** H, Cai Y. The legumes and pseudocereals. *Amaranth: Overview. China: Food Science* **2016**; 1-10.

**Corke** y Cai. *Amaranth: Overview. Reference module in food science* **2016**: 1-6.

**Cortés** EL., Espitia E, Rivas-Valencia P, y. Hernández-Casillas JM. Diagnóstico socioeconómico de la producción de amaranto en Valles Altos. VI Reunión Nacional de Innovación Agrícola. León, Guanajuato, México; **2009**: 327.

**Cuj-Laines** R, Hernández-Santos B, Herman-Lara E, Martínez-Sánchez JM, Juárez-Barrientos JM, Torruco-Uco JG, Rodríguez-Miranda J. Relevant aspects of the development of extruded high-protein snacks: an alternative to reduce global undernourishment. México: *National Technology of México* **2018**: 141-166.

**De Castro** A. In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of sorghum products. Thesis. *Food Sci and Tech* **2006**: 1-98.

**Depósito de documentos de la FAO**. Capítulo 26. Cereales, raíces feculentas y otros alimentos con alto contenido de carbohidratos. [monografía en internet].

Roma: Nutrición humana. **2002**. [2017/09/2]: 26-30. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/w0073s/w0073s0u.htm>.

**Deshpande S** y Cheyran M. Determination of phenolic compounds of dry beans using vanillin, redox and precipitation assays. *Journal of Food Science* **1987**; 52: 245-516.

**Diccionario de la Lengua Española**. Botana. Editorial Larousse **2016**.

**Domanski, C.**, Giorda L. Feresin O., Composición y calidad del grano de sorgo. EEA INTA Manfredi, Arg., Cuaderno de Actualización **1997**; 7, 47-50.

**Drewnoski A**. Taste preferences and food intake. *Annu. Rev. Nutr.* **1997**; 17:237-253.

**Dupuis J**, Liu Q, Yada Y. Methodologies for increasing the resistant starch content of food starches: A review. *J Food Sci* **2014**; 13: 1219-1234.

**Dykes L, Rooney L, Waniska RD, Rooney W**. Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **2005**: 53: 6813-6818.

**Dykes L., Rooney, L W**. Sorghum and millet phenols and antioxidants. *J. Cereal Sci.* **2006**; 44; 236–251.

**Dyner L, Cagnasso C, Ferreyra V, Pita ML, Apro N, Olivera C**. Contenido de calcio, fibra dietaria y fitatos en diversas harinas de cereales, pseudocereales y otros. *Acta Bioquim Clin Latinoam* **2016**; 50 (3): 435-443.

**EFSA**. Panel on dietetic products, nutrition, and allergies (NDA); scientific opinion on dietary reference values for carbohydrates and dietary fibre. *EFSA Journal* **2010**; 8(3): 1462.

**Enriquez, M**. Evaluación del efecto del proceso de extrusión sobre harina normal y germinada de quinua para la obtención de un producto precocido. Tesis Ingeniería de alimentos]. Popayán (Colombia): Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingeniería de Alimentos, **2014**;36, 42-47, 53-58, 66-67.

**Ensmiger A**. *Foods and Nutrition encyclopedia*. Second edition. Nueva York: CRC Press editorial, **2000**; vol 1: 208-209.

**ENSOD.** Estrategia Nacional para la Prevención y el Control del Sobrepeso, la Obesidad y la Diabetes. IEPSA, México: **2013**: 13-37.

**Espitia R. E,** Mapes C, Núñez C y Escobedo D. Distribución geográfica de las especies cultivadas de *Amaranthus* y de sus parientes silvestres en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, **2012**: 3: 427-437.

**Estudio FAO.** 1999. Carbohidratos en la nutrición humana. Italia. FAO, **1999**: 30, 78.

**Euromonitor International.** Aperitivos salados en México. Euromonitor. [serie de internet] **2016** [consultado 2018 enero 1]. Disponible en: <http://www.euromonitor.com/savoury-snacks-in-mexico/report>

**FAO.** El sorgo y el mijo en la nutrición humana. [serie de internet]. **1995**. [consultado 2017 septiembre 2]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T0818S/T0818S01.htm#Sorgo>

**Fares C. Platani V, Baiano A, Menga, V.** Effect of processing and cooking on phenolic acid profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta enriched with debranning fractions of wheat. Food Chemistry **2010**; 119: 1023-1029.

**FDA.** Nutrition education resources and materials. Dietary fiber. [serie de internet]. **2019**. [consultado 15 de julio]. Disponible en: [https://www.accessdata.fda.gov/scripts/interactivenutritionfactslabel/factsheets/dietary\\_fiber.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/scripts/interactivenutritionfactslabel/factsheets/dietary_fiber.pdf)

**Fellows PJ.** Food processing technology. Fourth edition. New York: Woodhead Publishing, **2017**: 753-780.

**Ferreira T y Áreas J.** Calcium bioavailability of raw and extruded amaranth grains. Ciencia y tecnología de alimentos. **2010**; 30:532-538.

**Ferreira, T.A.D.C., Areas, J.A.G.** Protein biological value of extruded, raw and toasted amaranth grain. Pesquisa Agropecuaria Trop **2004**; 34, 53–59.

**Ferreras R.** Análisis reológico de las diferentes fracciones de harina obtenidas en la molienda del grano de trigo. Universidad de Salamanca, **2009**.

**Filipovic A**, Kormanjo S, Sakac M, Filipovic J, Psadarov D. Okanovic D. Effect of extrusion on nutritive value of animal feed. Extrusion technology and food processing. **2010**: 97-113.

**Flores H**, Acosta-Cázares M, Klunder-Klunder G. Gutiérrez-Trujillo G. Consumo de alimentos saludables o con riesgo a la salud. ENCOPREVENIMSS, **2006**: 64.

**Food Security Department**. SORGHUM: Post-harvest Operations. Natural Resources Institute. FAO. INPhO **1999**: 3-4.

**Forsido S.F.** and Ramaswamy HS. Protein rich extruded products from tef, corn and soy protein isolate blends. J Appl Sci Technol. **2011**; 2: 75–90.

**Fuentes-Zaragoza E**, Riquelme-Navarrete MJ, Sánchez-Zapata JA, Pérez Álvarez A. Resistant starch as functional ingredient: A review. Food Research International **2010**; 43: 931-942.

**Fukomoto LR** y Mazza G. Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. Journal of Agricultural and Food Chemistry **2000**; 48: 3597-3604.

**Gaytán-Martínez M**, Cabrera-Ramírez AH, Morales-Sánchez E, Ramírez-Jiménez AK, Cruz-Ramírez J, Campos-Vega, R, Velazquez G, Loarca-Piña SM. Effect of nixtamalization process on the content and composition of phenolic compounds and antioxidant activity of two sorghums varieties. Journal Chemistry Science **2017**; 77:1-8.

**Gearhart M.**, Rosentrater A., Extrusion processing of amaranth and quinoa, Agricultural and Biosystems Engineering. Iowa State University, Dept. of Agricultural and Biological Systems Engineering, ISU, Ames, IA **2014**: 3-28.

**Gil A.** Tratado de nutrición. Tomo II. Composición y calidad nutritiva de los alimentos. Segunda edición. Madrid: Editorial Médica Panamericana, **2010**; vol. 2: 181-183, 538.

**Gong E**, Luo S, Li T, Liu C, Zhang G, Chen J, Zeng Z, Hai R. Phytochemical profiles and antioxidant activity of processed brown rice products. Food Chem **2017**; 17: 543-545.



**Gonzalez K.** Biodisponibilidad de la proteína en la tortilla extrudida de sorgo. Saltillo, Coahuila, Mexico. Tesis de Licenciatura. Universidad Autonoma Agraria “Antonio Narro” **2014**: 12-48.

**González-Zepeda K.** Biodisponibilidad de la proteína en tortilla extruida de sorgo. Tesis. Coahuila. Universidad Autónoma Agraria **2015**: 1-145.

**Gorinstein S,** Medina-Vargas O. J, Jaramillo N. O, Arnao-Salas I, Martínez-Ayala A. L, Arancibia-Avila P, Toledo F, Katrich, E, Trakhtenberg S. The total polyphenols and the antioxidant potentials of some selected cereals and pseudocereals. *European Food Research and Technology* **2007**; 225, 321–328.

**Gupta P,** Varshney R. *Cereal Genomics*. Second edition. New York: Kluwer Academic Publishers, **2005**: 1.

**Gutiérrez O.,** Martínez S., Hernández B., Rodríguez G. Cambios fisicoquímicos en harinas nixtamalizadas de maíz y sorgo como una función del tiempo de reposo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* **2016**; 1:104-110.

**Guzman S,** **Paredes O.** Functional products of plant indigenous to Latin America. Amaranth and Quinoa, common beans and botanicals. In: Mazza, G. (Ed.), *Functional Foods. Biochemical and Processing Aspects*. Technomic Publishing Company, Pennsylvania **1998**: 293–328.

**Harlan JR,** de Wet JMJ. Clasificación simplificada del sorgo cultivado. *Crop Science* **1972**; 12: 172-176.

**Heim, K.E.,** Tagliaferro, A.R., Bobilya, D.J... Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. *Journal Nutr. Biochem* **2002**;13: 572–584.

**HENUFOOD.** Técnicas culinarias y tecnología alimentaria: efecto en la nutrición. Madrid (España): **2012**: 3.

**Herald TJ,** **Gadgil P,** **Tilley M.** High-throughput micro plate assays for screening flavonoid content and DPPH-scavenging activity in sorghum bran and flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **2012**; 92: 2326–2331.

**Hernandez M.**, Sastre A. Tratado de nutrición. Madrid: Editorial Díaz de Santos, **1999**: 127 – 589.

**Hough G.** Sensory Shelf life estimation of food products. CRC editorial. US: **2010**: 36-37.

**Hu J**, La Vecchia C, Augustin LS, Negri E, Groh M, Morrison H. Glycemic index, glycemic load and cancer risk. *Annals of Oncology* **2013**; 24: 245-251.

**Hu Z**, Tang X, Zhang M, Hu X, Yu C, Zhu Z, Shao Y. Effects of different temperatures on extrusion behavior, phenolic acids, antioxidant activity, anthocyanins and phytosterols of black rice. *RSC* **2018**; 8: 7123-7132.

**IHME.** México. [serie de internet]. **2016**. [consultado 2017 noviembre 1]. Disponible en: <http://www.healthdata.org/mexico?language=149>

**Ilo S**, Schoenlechner R, Berghote E. Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Food Tech* **2000**; 51: 97-110.

**INCAP.** Cereales y sus productos. Módulo II. Selección, preparación y conservación de alimentos. Panamá, Instituto de nutrición de Centro América y Panamá (INCAP); **2015**: 1-3.

**Industria Alimenticia.** [serie de internet]. **2009**. [consultado 2017 noviembre 1]. Disponible en: <https://www.industriaalimenticia.com/articles/83522-la-actualidad-del-segmento-de-las-botanas-en-mexico>

**INEGI.** Características de las defunciones registradas en México durante 2017. [Consultado 2019 febrero 20]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodem/DEFUNCIONES2017.pdf>

**Jafari M**, Koocheki A, Milani E. Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates. *Journal of Food Science* **2017**; 75: 324-331.

**Jáuregui C.**, Silva P., Aréas G., Extrusion Cooking Process for Amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) *Food Engineering and Physical Properties JOURNAL OF FOOD SCIENCE* **2000**: 65-6.

**Jenkins** DJ, Axelsen M, Kendall CWC. Dietary fiber, lente carbohydrates and the insulin resistant diseases, Br J Nutr , **2000**; 83: 157-163.

**Jiménez** R, González N, Magaña A, Corona A. Contenido de almidón resistente en alimentos consumidos en el sureste de México. U Tecnociencia **2011**; 5: 27-34.

**Jing** Y y Chi Y. Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue. Food Chem **2013**; 138: 884–889.

**Kaur** S, Sharma S, Singh B, Dar BN. Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans. Journal of Food Science and Technology **2015**; 52: 1670–1676.

**Kaur** S, Singh N, Chand J. Amaranthus Hypochondriacus and amaranthus caudatus germplasm: Characteristics of plants, grain and flours. Food Chemistry **2010**; 132: 1227-1234.

**Khan** I, Yousif A, Johnson S, Gamlath S. Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta. Food Research International **2013**; 54: 578-586.

**Konica-Minolta**. Entendiendo el espacio de color CIE\*L\*A\*B. Sensing Americas [serie de internet]. [consultado 23 de mayo 2019]. Disponible en: <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>

**Kulp** K, Ponte J. Handbook of cereal science and technology. Second edition. Nueva York: Marcel Dekker, **2000**: 154.

**Lallemand Inc**. Guia de leudantes Quimicos. Tecnología práctica de Lallemand Inc., Lallemand México y American Yeast Sales, Productores y distribuidores de Levadura Eagle, fresca y seca. **2015**; 1,12.

**Lara** N. Mejía A. Cangás A. Impact of Processing Techniques on Nutrient and Anti-Nutrient Content of Grain Amaranth (*A. Albus*). INIAP **2007**; 24-28.

**Limsangouan** N, Takenaka M, Sotome I, Nanayama K, Charunuch C, Isobe S. Functional properties of cereal and legume based extruded snack foods fortified with by-products from herbs and vegetables. *J Nat Sci* **2010**; 44: 271-279.

**Lira** MR. Guía para la Evaluación Sensorial de Alimentos. Instituto de Investigación Nutricional [serie de internet]. **2007**. [consultado 3 de enero 2019]. Disponible en: <http://lac.harvestplus.org/wp-content/uploads/2008/02/Guia-para-la-evaluacion-sensorial-de-alimentos.pdf>

**Llopart** E., “Efectos de las condiciones de extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos extruidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos” Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos Universidad Nacional del Litoral Facultad de Ingeniería Química, **2011**:85-88.

**Llopart**, E, **Drago**, S, **Gonzalez** R. Efectos de las condiciones de extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos extruidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos” Universidad Nacional del Litoral Facultad de ingeniería Química **2011**: 8-34.

**Lobato** LP, Anibal D, Lazaretti M, Grossman M. Extruded puffed functional ingredient with oat bran and soy flour. *Food Sci Tech* **2011**; 44: 933-939.

**Madonna** T, Gudipati V, Chouksey MK. Amylose-lipid complex formation during extrusion cooking: Effect of added lipid type and amylose level on corn-based puffed snacks. *Journal of Food Science and Technology* **2014**; 39: 309-316.

**Mariscal** R, Figueroa J, Santiago-Ramos D, Arámbula G, Jiménez S, Rayas-Duarte P, Vélez-Medina J, Martínez H. The effect of different nixtamalisation processes on some physicochemical properties, nutritional composition and glycemic index. *Journal of cereal science* **2015**; 65: 140-146.

**Marquez-Molina** O and Lopez-Martinez L. Effect of various process conditions on the nutritional and bioactive compounds of Amaranth. *Intech Open*. **2019**: 1-5.

**Martínez** BF y Pau CL. Extrusión de sorgo integral y decorticado. *Agron Mesoam*. **1992**; 3, 40-44.

**Matos-Chamorro**, A.; E. Chambilla-Mamani. Importancia de la fibra dietética, sus propiedades funcionales en la alimentación humana y en la industria alimentaria. Revista de Investigación en Ciencias y Tecnología de Alimentos **2010**; 1: 5-17.

**Meilgaard** M C., Civille G., Carr B T.. Sensory Evaluation Techniques. Quinta edición. Taylor and Francis Group. **2016**: 321.

**Meilgaard** MC, Vance G, Carr B. Sensory evaluation techniques. Fifth edition. New York: CRC Press, **2016**: 307-321.

**Mesa** NJ, Alavi Sm Bean S. Sorghum proteins: the concentration, isolation, modification, and food applications of kafirinas. J Food Sci **2010**; 75: 90-104.

**Mesas**, J.; M. Alegre. El pan y su proceso de elaboración. Ciencias y Tecnología de Alimentos **2002**; 3: 307-313.

**Mesa-Stonestreet** J., Alavi S., Bean S. Sorghum proteins: the concentration, isolation, modification, and food applications of kafirins. J Food Sci **2010**; 75: 90-104.

**Mohd**, N.; T. Ling; L. Su Peng. By-products of Rice Processing: An Overview of Health Benefits and Applications. Journal Rice Research 2013;1: 1-11.

**Molyneux** P. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity, Songklanakarin Journal of Science and Technology **2004**; 26: 211-219.

**Morris** P, Bryce J. Cereal Biotechnology. Cambridge: CRC Press LLC, **2000**: 1-2.

**Murakami** T, Yutani A, Yamano Tm Iyota H, Konishi Y. Effects of popping on nutrient contents of amaranth seed. Plants Food Hum Nutr **2014**; 69, 25-29.

**Muyonga** J, Andabati B and Ssepuyya G. Effect of heat processing on selected grain amaranth physicochemical properties. Food Science and Nutrition **2013**; 2: 9-16.

**Muyonga** J, Andabati B, Ssepuyya G. Effect of heat processing on selected grain amaranth physicochemical properties. Food Science and Nutrition **2013**; 2, 9-16.

**Myers** RL. Amaranth: New crop opportunity. Progress in new crops. ASHS Press, **1996**: 207-220.

**Navarro-Cortez** RO, Castro-Rosas J, Aguilar-Palazuelos. E, Rodríguez-Miranda J, Medrano-Roldan H, Delgado-Licon E, Acevedo OA, Gómez-Aldapa CA, Uresti-Marín RM, Ramírez de León JA. Los alimentos en México y su relación con la salud. México: San Rafael, **2014**: 177-190.

**Nenandis** N, Wang L, Tsimidou M, Zhang H. Estimation of scavenging activity of phenolic compounds using the ABTS+assay. Journal of Agricultural and Food Chemistry **2004**; 52: 4669-4674.

**Ngwenya** NR. Effect of sorghum type and processing on the antioxidant properties of sorghum [*sorghum bicolor (l.) moench*] based foods. Thesis for Doctor of Philosophy. Texas A&M University **2007**.

**NIH**, National Institutes of Health. The National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases Enfermedad celíaca. Health Information Center. USA.gov, **2012**.

**NIH**. National Institute of Diabetes and digestive and kidney diseases. Department of Health and Human Services. [serie de internet]. **2012**. [consultado 2018 septiembre 25]. Disponible en: <https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/enfermedades-digestivas/enfermedad-celiaca/definicion-informacion>

**Nissar** J, Ahad T, Naik HR, Hussain SZ. Effect of extrusion conditions on colour coordinates of breakfast snacks using corn honey blends. Int J Food Sci Nutr **2017**; 2:75-82.

**Njoki** J, Sila DN, Onyango AN. Impact of Processing Techniques on Nutrient and Anti-Nutrient Content of Grain Amaranth (*A. albus*). Food Science and Quality Management; **2014**; 25: 10-16.

**NMX-FF-034-1995**. Productos alimenticios no industrializados. Cereales. Maíz (*Zea mays L.*) Especificaciones y métodos de prueba. Non industrialized food products. Cereales. Corn (*Zea mays L.*). Specifications and test methods. Normas mexicanas. Dirección general de normas.

**NMX-FF-037-1994.** Productos alimenticios no industrializados para consumo humano. Cereales. Sorgo. (*Sorghum vulgare L.*) Non industrialized food products por human use. Cereals. (*Sorghum vulgare L.*) Specifications and test method. Normas mexicanas. Dirección general de normas.

**NOM-051-SCFI/SSA1-2010,** Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados- Información comercial y sanitaria.

**NOM-147-SSA1-1996,** bienes y servicios. Cereales y sus productos. Harinas de cereales, semolas o semolinas. Alimentos a base de cereales, de semillas comestibles, harinas, semolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales.

**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.

**NOM-FF-55-1984** Productos Alimenticios no Industrializados Para uso Humano - Cereales - Trigo - Método de Prueba.

**OCDE.** Obesity update [serie de internet] **2017** [consultado 2019 marzo 18]: 1-10. Disponible en: <https://www.oecd.org/els/health-systems/Obesity-Update-2017.pdf>

**Ocheme B.** y **Mikailu E.** Effect of alkaline soaking and cooking on the proximate, functional and some anti-nutritional properties of sorghum flour. AUJT **2016**; 14: 210-216.

**Okarter N.** Phenolic Compounds from the Insoluble-Bound Fraction of Whole Grains Do Not Have Any Cellular Antioxidant Activity. Life Sciences and Medicine Research **2012**; LSMR-37.

**OMS.** Informe sobre la situación mundial de las enfermedades no transmisibles 2010. Resumen de orientación. Suiza, **2011**: 10.

**Oomah D,** Cardador-Martínez A, Loarca-Piña G. Phenolics and antioxidative activities in common beans (*Phaseolus vulgaris L.*). Sci Food Agric **2005**; 85:935-942.

**Panorama agroalimentario.** Sorgo. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial. México: FIRA, **2016**: 3-8, 15.

**Paredes O**, Guevara F, Bello L. La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. Revista de cultura científica [serie de internet] **2009** [consultado 2019 febrero 20]; 92: 92-93. Disponible en: <https://www.revistaciencias.unam.mx/en/41-revistas/revista-ciencias-92-93/205-la-nixtamalizacion-y-el-valor-nutritivo-del-maiz-05.html>

**Pérez-Navarrete C**, González R, Chel-Guerrero L and Betancur-Ancona D. Effect of extrusion on nutritional quality of maize and lima bean flour blends. J Sci Food Agric N **2006**; 86, 2477-2484.

**Pinto V**, Oliveira T, Souza MI, Della S, Melo L, Rodrigues Vm, Bressan J. Influence of package and health-related claims on perception and sensory acceptability of snack bars. Food Research International. **2017**; 101: 103-113.

**Poquette NM**, Gu X, Lee S. Grain sorghum muffin reduces glucose and insulin response in men. Royal Society of Chemistry **2014**; 5: 894-899.

**Prasad M**, Rao V, Kalpana K, Patl J. Glycaemic index and glycaemic load of sorghum products. J Sci Food Agric **2014**; 76: 5-56.

**PROY-NOM-216-SSA1-2002** proyecto de norma oficial mexicana, productos y servicios. Botanas. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.

**Pulido C**. Análisis sensorial de productos selectos propios de semillería y diseño de sus ofertas. Certificado de profesionalidad. S.L: IC editorial, **2008**: 48.

**Ragaee S**, **Abdel-Aal EM**, **Noaman M**. Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use. Food Chem **2006**; 98: 32-38.

**Rakshit S**, Wang Y. The sorghum genome. Compendium of plants genome. Switzerland: Springer, **2016**: 14.

**Ramaswamy H**, Marcotte M, Sastry S, Abdelrahim K. Ohmic heating in food processing. Electro-Tecnologies for Food Processing Series. New York. Editorial Taylor and Francis Group, **2014**; 3, 7-8.



**Ramírez, J.**, Caracterización físico-química de pellets extruidos de torta de higuerilla (*Ricinus comunis* L) visando su uso en alimentos balanceados. Embrapa Agroindústria de Alimentos, **2013**: 1-6.

**Ramos-Díaz J.M.**, Kirjoranta S, Tenitz S, Penttilä, P.A, Serimaa R, Lampi A.M., Jouppila K. Use of amaranth, quinoa and kaniwa in extruded corn-based snacks. *J. Cereal Sci* **2015**; 58, 59–67.

**Ratnavathi CV**, Patil JV, Chavan UD. Sorghum biochemistry. Chennai: El Sevier, **2016**: 12-20.

**Repo R**, **Peña J**, **Kallio H**, **Salminen S**. Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science* **2005**; 49: 219–224.

**Repo-Carrasco-Valencia R**, Peña J, Kallio H, Salminen S. Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science* **2009**; 29: 219-224.

**Resio A**, Aguerre R, Suarez C. Drying characteristics of amaranth grain. *Journal of Food Engineering* **2004**; 65:197–203.

**Ríaz M.N.** Extruders in food applications. Nueva York: CRC Press, **2000**: 193-197.

**Rodríguez-Vidal A.** Desarrollo de una botana expandible enriquecida baja en grasa. Tesis doctoral. Doctorado en tecnología avanzada. CICATA. IPN, México; **2017**: 73.

**Ruiz-Roca B.** Propiedades antioxidantes de los productos de la reacción de Maillard y su influencia en la absorción de hierro y cobre. Tesis doctoral. Universidad de Granada. **2009**: 84-86.

**Salazar-López N**, González-Agular G, Rouzand-Sández O, Robles-Sánchez M. Technologies applied to sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench): changes in phenolic compounds and antioxidant capacity. *Food Science and Technology* **2018**; 38: 369-382.

**Salazar-López** N, Loarca-Pila G, Campos-Vega R, Gaytán-Martínez M, Morales-Sánchez E, Esquerro-Brauer M, González-Aguilar G, Robles-Sánchez M. The Extrusion Process as an Alternative for Improving the Biological Potential of Sorghum Bran: Phenolic Compounds and Antiradical and Anti-Inflammatory Capacity. *Hindawi*. **2016**: 1-7.

**Sanchez** V., Morales E., Martínez. M. Obtención de harinas instantáneas de sorgo blanco por extrusión para la elaboración de tortillas. Tesis para obtener el grado de Maestría en tecnología avanzada. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. **2014**: 51-58.

**Sánchez** Víctor Manuel. Obtención de harinas instantáneas de sorgo blanco por extrusión para la elaboración de tortillas. Centro de investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Unidad Querétaro. México, Tesis para obtener el grado de Maestría en tecnología avanzada, **2014**: 28.

**Sanidad**. Nutrición y dietética. España: Editorial publicaciones vértice, **2010**: 7.

**Santra** DK y Schoenlechner R. Sustainability, processing, and applications of Amaranth, Plant derived proteins. Viena: Elsevier/Academic Press, **2017**: 258-263.

**Sauer** JD. Historical geography of crop plants: A select roster. Boca Raton: CRC Press, **1993**: 140-180.

**Serna-Saldivar** S, Knabe D, Rooney LW, Tanksley T, Sproule M. Nutritional Value of sorghum and maize tortillas. *JCS* **1988**; 7: 83-94.

**Serna-Saldivar** S, Knabe D, Rooney LW, Tanksley T, Sproule M. Nutritional Value of sorghum and maize tortillas. *Journal of Cereal Science*, **2008**; 83-94.

**Shen** S, Huang R, Li C, Wu W, Chen H, Shi J, Chen S and Ye X. Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among sorghum grains with different applications. *Molecules*: **2018**; 23: 2-15.

**Shewry** PR, Tatham AS. The prolamin storage proteins of cereal seeds: structure and evolution. *Biochem J* 1990; 267:1–12.

**Singh N, Sharma S, Singh B.** The effect of sodium bicarbonate and glycerol mostearate addition on the extrusion behavior of maize grits. *J Food Eng* **2000**; 46: 61-66.

**Singh N, Singh P, Sehvani K, Viridi A.** Amaranth: Potencial Source of flour enrichment. India:Elsevier/Academic Press, **2019**: 123-136.

**Singh P, Seth A, Kumar P.** Coexistence of celiac disease and type 1 diabetes mellitus in children. *Indian J Med Res* **2017**; 145: 28-32.

**Singleton VL y Rossi JA.** Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* **1965**; 16:144-158.

**Sobota A., Sykut-Domanska E, Rzedzicki, Z.** Effect of extrusion-cooking process on the chemical composition of corn-wheat extrudates, with particular emphasis on dietary fibre fractions. *Pol. J. Food. Nutr. Sci* **2010**; 60 (3): 251–259.

**Solicitud de patente MX/a/2007/016262.** Alimentador transportador para masa y harina de maíz. Universidad Nacional Autónoma de México. Dirección General de Evaluación Institucional Patentes solicitadas y otorgadas, [serie de internet]. **1991-2009.** [consultado 2019 junio 6]. Disponible en: <http://www.dgei.unam.mx/patentes/IPN.pdf>

**Soriano JM.** Nutrición básica humana. Valencia: Universitat de Valencia, **2011**: 37-38.

**Stephen AM, Champ M., Cloran, SJ, Fleith, M, van Lieshout L, Mejbourn H.** Dietary fibre in Europe: Current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health. *Nutrition Research Reviews* **2017**; 30: 149–190.

**Strader A.D. and Woods, S.C.** Gastrointestinal hormones and food intake. *Gastroenterology* **2005**; 128: 175–191.

**Sun T and Ho C.** Total phenolic content and antioxidant activity of cereals. American Chemical Society. New jersey **2008**: 143-149.

**Tapia M.** Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. Segunda Edición. Santiago: Edición FAO: **1987**: 110-113.

**Taylor J, Awika J.** Cereals, Pseudocereals, and Legumes: Sustainable, Nutritious, and Health-Promoting Foods for the 21st Century. Woodhead. Kingdom. Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. United, **2017**: 131-148.

**Taylor J, Schober T, Bean S.** Novel food and non-food uses for sorghum and millets. Journal of Cereal Science **2006**; 44, 252–271.

**Taylor, J., Shewry, P.** Preface to sorghum and millets reviews. Journal of cereal science **2006b**; 44, 223.

**Torres N, Palacios-González B, Noriega-López L, Tovar-Pala A.** Índice glicémico, índice insulinémico y carga glicémica de bebidas de soya con contenido bajo y alto de hidratos de carbono. RIC **2006**; 58:487-497.

**Tostelusa.** Máquina para churros de maíz. [serie de internet] **2015** [consultado 2018 mayo 17]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=eMtAcIHsqvQ>

**Turner DL.** The use of specialty sorghums for expy ed snack food processing. Thesis for Master of Science. Texas A&M University **2004**: 1-32.

**University of Sydney.** About Glycemic Index. [serie de internet] **2017** [consultado 2018 diciembre 13]. Disponible en: <http://www.glycemicindex.com/about.php>

**Vargas-Solórzano JW, Wanderlei C, Yoshie C, Ramírez JL, Aparecida V.** Physicochemical properties of expanded extrudates from colored sorghum genotypes. FRI **2014**; 55:37-44.

**Vega-López S, Venn B, Slavin J.** Relevance of the glycemic index and glycemic load for body weight, diabetes and cardiovascular disease. MPDI; **2018**; 10: 14-27.

**Vieira S, Castelli S, Desideri A.** Importance of a stable topoisomerase IB clamping for an efficient DNA processing: Effect of the Lys 369 Glu mutation. International Journal of Biological Macromolecules **2015**; 81, 76–82.

**Vieira V. Santana C. Bezerra C.** Nutritional composition of sorghum [sorghum bicolor (L.) Moench] genotypes cultivated without and with water stress. JCS **2015**; 65:103-111.

**Vitaglione P**, Mennella I, Ferracane R. Whole-grain wheat consumption reduces inflammation in a randomized controlled trial on overweight and obese subjects with unhealthy dietary and lifestyle behaviors: role of polyphenols bound to cereal dietary fiber. *Am J Clin Nutr* **2015**; 101: 251-61.

**Wani SA** and Kumar P. Effect of extrusion on the nutritional, antioxidant and microstructural characteristics of nutritionally enriched snacks. *Journal Food of Processing and Preservation* **2016**; 40: 166-173.

**Wojtowicz A**, Zalewska-Korona M, Jablonska-Rys E, Skalicka-Wozniak K, Oniszczuk A. Chemical characteristics and physical properties of functional

**Wrigley C.**, Corke H., Seerharaman K., Faubion J. *Encyclopedia of food grains. The World of Food Grains. Second Edition. UK. Editorial ELSEVIER. 2016*; vol 1: 230-232, 415.

**Wu G**, Johnson SK, Bomman JF, Bennet SJ, Fang Z. Changes in whole grain polyphenols and antioxidant activity of six sorghum genotypes under different irrigation treatments. *Food Chemistry* **2017**; 214:199-200.

**Yan S**, Xiaorong W, Dahlberg J, Bean SR, Findlay M, Wilson JD, Donghai W. Properties of field-sprouted sorghum and its performance in ethanol production. *JCS* **2010**; 51:374-3.

**Yanniotis S**, Petraki, A, Soumpas IE. Effect of pectin and wheat fibers on quality attributes of extruded cornstarch. *J Food Eng* **2007**; 80:594–599.

**Zenil N**, Colinas MT, Bautista C, Vázquez T, Lozoya H, Martínez MT. Fenoles totales y capacidad antioxidante estimada con los ensayos DPPH/ABTS en rosas en soluciones preservantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **2014**; 5: 1029-1039.

## ANEXOS

### ANEXO A. Formato de evaluación sensorial

Edad: \_\_\_\_\_ Ocupación: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Por favor marque los productos que habitualmente consume; puede marcar más de una opción

Tipo de producto	Marcar con ✓
Churros	
Papas fritas	
Papas horneadas	
Cacahuates	

1.- Escriba la clave de las muestras presentadas. Evalúelas colocando una cruz (X) en la escala que describa mejor la reacción hacia el atributo mencionado.

APARIENCIA									
Clave	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo

2. Por favor tome unos sorbos de agua entre las muestras y evalúe el atributo mencionado colocando una cruz (X) según la reacción que lo describa mejor

<b>SABOR</b>									
<b>Clave</b>	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo

<b>INTENSIDAD DE SABOR</b>									
<b>Clave</b>	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo

INTENSIDAD DE SABOR SALADO									
Clave	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo

3. Por favor tome unos sorbos de agua y evalúe las muestras que se le presentan colocando una cruz (X) según la reacción que tenga sobre el atributo mencionado. Por favor tome un trocito de pan entre cada una de las muestras.

RESABIO									
Clave	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo



4. Por favor tome unos sorbos de agua entre muestra y muestra y evalúe el atributo mencionado colocando una cruz (X) según la reacción que lo describa mejor

<b>CRUJENCIA</b>									
<b>Clave</b>	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo

<b>TEXTURA GENERAL</b>									
<b>Clave</b>	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo

5.- Evalúe el atributo mencionado colocando una cruz (X) según la reacción que lo describa mejor

AGRADO GENERAL									
Clave	Me disgusta muchísimo	Me disgusta mucho	Me disgusta	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta muchísimo

6.- Si este producto estuviera disponible donde usted habitualmente compra, ¿qué será lo que probablemente hará? Marque sólo una opción.

INTENCIÓN DE COMPRA					
Clave de la muestra	Definitivamente lo compraría	Probablemente lo compraría	No sé si lo compraría o no	Probablemente sí lo compraría	Definitivamente sí lo compraría

COMENTARIOS:

---



---



---



---

## ANEXO B Curvas de calibración

### ANEXO B

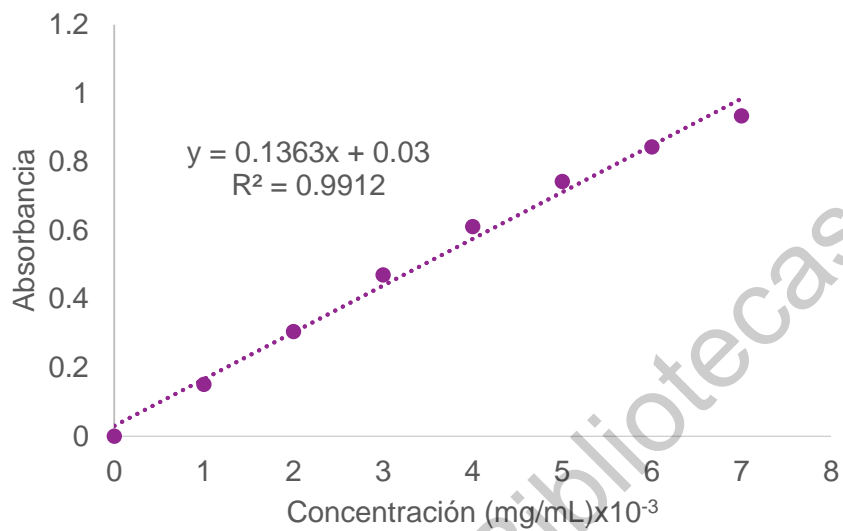


Figura B1. Curva de calibración fenoles totales

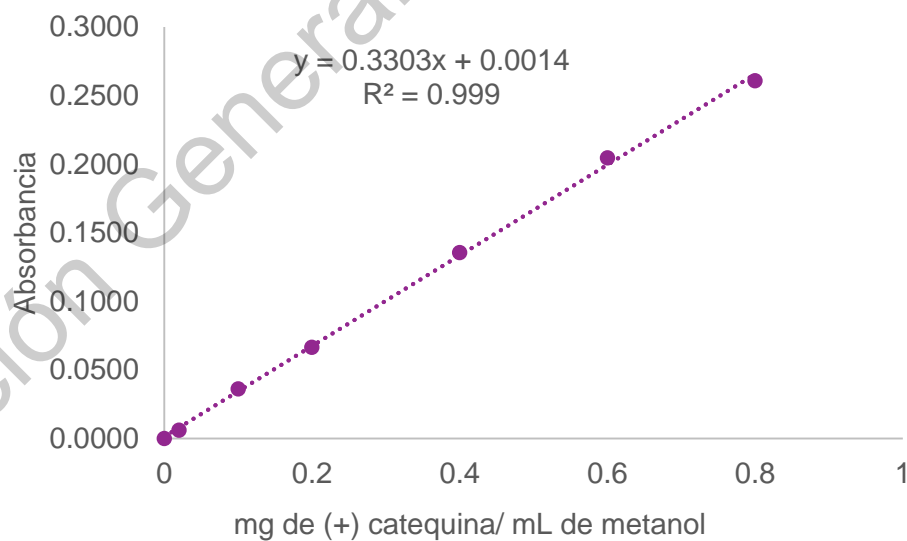


Figura B2. Curva de calibración taninos condensados

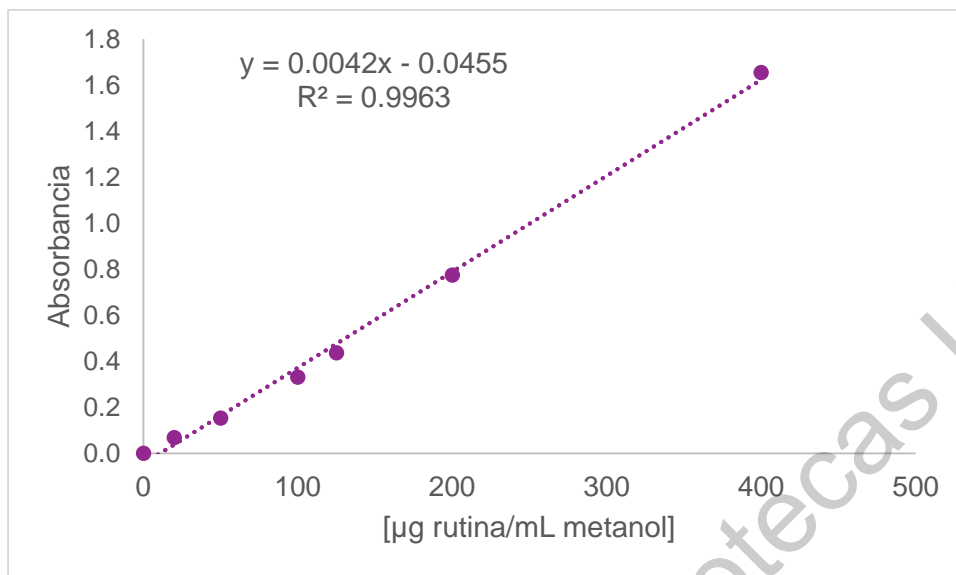


Figura B3. Curva de calibración flavonoides

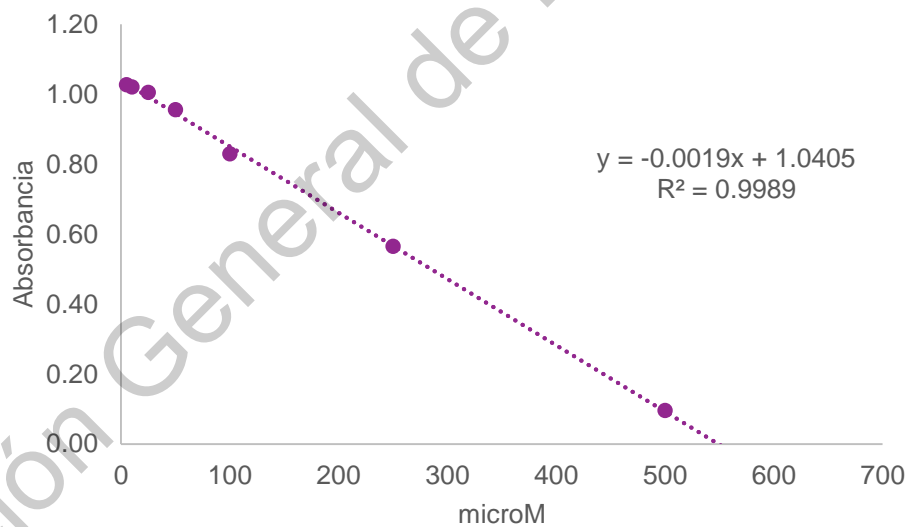


Figura B4. Curva de calibración capacidad antioxidante ABTS

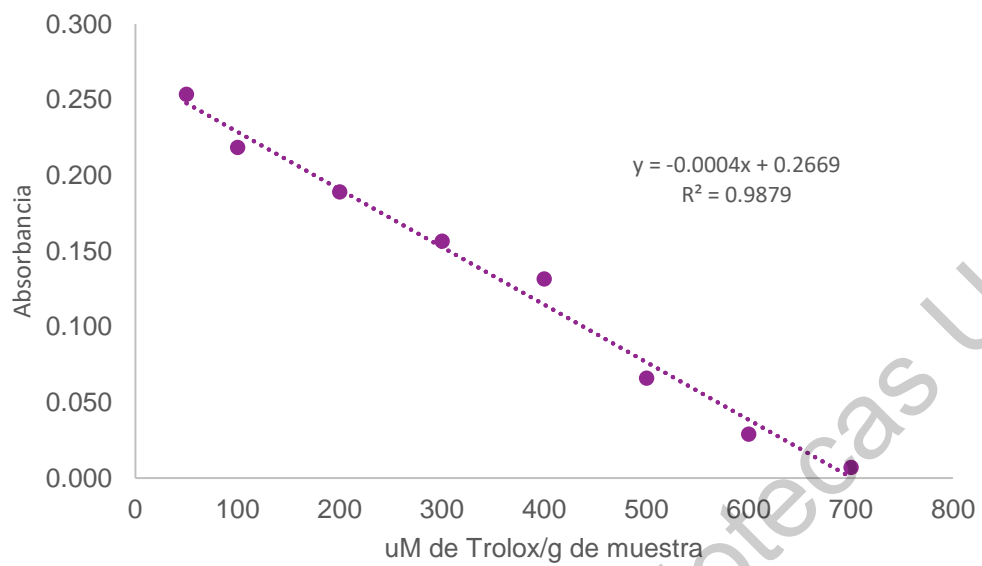


Figura B5. Curva de calibración capacidad antioxidante DPPH