



**Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo A.C.**

**PRODUCTOS DE PANIFICACIÓN NUTRITIVOS CON
HARINAS DE MAÍZ, AMARANTO, CAMOTE Y CHÍA, PARA
PERSONAS CON ENFERMEDADES ASOCIADAS AL TRIGO**

Por:

ENRIQUE ABRAHAM PINEDA DÍAZ

TESIS APROBADA POR LA

COORDINACIÓN DE NUTRICIÓN

Como requisito parcial para obtener el título de

MAESTRO EN CIENCIAS

APROBACIÓN

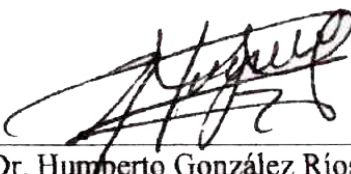
Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Enrique Abraham Pineda Díaz, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias.



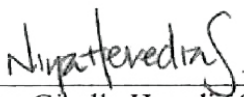
Dra. Ana María Calderón de la Barca
Directora de tesis



Dra. Alma Rosa Islas Rubio
Integrante del comité de tesis



Dr. Humberto González Ríos
Integrante del comité de tesis



Dra. Nina Gisella Heredia Sandoval
Integrante del comité de tesis

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis “Productos de Panificación Nutritivos con Harinas de Maíz, Amaranto, Camote y Chía, para Personas con Enfermedades Asociadas al Trigo” es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor Enrique Abraham Pineda Díaz, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión del director(a) de tesis.

 **CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.**
Coordinación de Programas Académicos


Dr. Pablo Wong Gonzalez
Director General

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, en especial a la Coordinación de Nutrición, por aceptarme como estudiante durante estos dos años de maestría.

Esta tesis forma parte del proyecto clave: B-S-3869 “Rediseño tecnológico de productos de panificación con ingredientes de la gastronomía prehispánica en México”, financiado por fondos sectoriales Conacyt/SADER, por lo que se agradece el apoyo.

A mi comité de tesis: Dra. Alma Rosa Islas Rubio, Dr. Humberto González Ríos y Dra. Nina Gisella Heredia Sandoval, por su valiosa colaboración en el desarrollo de esta tesis.

A la Dra. Ana María Calderón de la Barca por aceptarme en su grupo de trabajo, por su paciencia, guía e innumerables consejos.

Al personal del Laboratorio de Proteínas: M.C. Adriana Bolaños, por las correcciones y ayuda; Q.B. Rene Valenzuela, por toda la ayuda con las técnicas de laboratorio. A los compañeros de laboratorio: Erika, Ana Lucía, Verónica, Esmeralda, Valeria, Fernando y Diego por la camaradería compartida.

A la Q.B. María del Carmen Granados (Pame) por su ayuda con las técnicas de panificación y al Dr. Francisco Vázquez Lara por su apoyo para las mediciones de textura. A los compañeros del Laboratorio de Cereales.

DEDICATORIA

Para Candy, Eirian, Mahonri y el pilón, mi tiempo.

CONTENIDO

APROBACIÓN.....	2
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL	3
AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	5
CONTENIDO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE CUADROS.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	13
2.1. El Pan Convencional con Harina de Trigo	13
2.2. Enfermedades Asociadas a la Ingestión de Trigo.....	14
2.3. Panificación con Mezclas de Diversas Harinas	15
2.3.1. Con Gluten.....	16
2.3.2. Sin Gluten	17
2.3.3. Componentes Básicos del Pan	17
2.3.3.1. Almidones.....	17
2.3.3.2. Agua.....	18
2.3.3.3. Proteína.....	18
2.3.4. Aditivos.....	19
2.3.4.1. Productos lácteos.....	19
2.3.4.2. Proteínas de huevo.....	19
2.3.4.3. Proteína de soya	19
2.3.4.4. Hidrocoloides	20
2.4. Potencialidad del Amaranto, Camote, Maíz y Chía	20
2.4.1. Amaranto	21
2.4.2. Camote	21
2.4.3. Maíz	22
2.4.4. Chía.....	22
2.4.5. Aporte de Nutrientes	23
2.4.6. Propiedades Tecnológicas de la Harina	24
2.5. Productos Libres de Gluten Disponibles en el Mercado	25
3. HIPÓTESIS	27
4. OBJETIVOS	28
4.1. Objetivo General.....	28
4.2. Objetivos Particulares.....	28

CONTENIDO (continuación)

5. MATERIALES Y MÉTODOS	29
5.1. Materiales	29
5.2. Obtención y Caracterización de Harinas	29
5.3. Análisis de Fenoles Totales y Actividad Antioxidante	29
5.4. Optimización de las Mezclas	30
5.5. Perfil Viscoamilográfico de las Harinas y Análisis Reológico de las Masas	30
5.6. Extracción del Mucílago de Chía	32
5.7. Condiciones de Panificación y Evaluación de los Productos	32
5.7.1. Volumen Específico	32
5.7.2. Análisis Proximal	33
5.7.3. Análisis de Textura	33
5.7.4. Análisis de Fibra Dietaria	34
5.7.5. Cuantificación de Gluten en Productos de Panificación	34
5.7.6. Análisis Estadístico	34
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
6.1. Preparación y Caracterización de Harinas	37
6.2. Análisis Proximal	38
6.3. Análisis de Fenoles Totales y Capacidad Antioxidante	39
6.4. Perfil de Viscosidad de las Harinas	40
6.5. Optimización de Mezclas de Harinas	41
6.6. Extracción del Mucílago de Chía	45
6.7. Condiciones de Panificación y Evaluación de los Productos	45
6.7.1. Análisis Proximal	50
6.7.2. Análisis de Textura	51
6.7.3. Análisis de Fibra	53
6.7.4. Cuantificación de Gluten en Productos de Panificación	53
7. CONCLUSIONES	55
8. REFERENCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Perfilador de superficie de las respuestas dureza (A) y cohesividad (B) de la masa.....	44
2	Corteza (I) y corte transversal (II) de los panes con las mezclas A, B y C con 100 y 120% de hidratación, así como la referencia con harina de trigo...	46
3	Corte transversal de los panes con las mezclas de harina de maíz blanco (A, B y C) o harina de maíz amarillo (A2, B2, C2), con 120% hidratación.....	47
4	Corteza (I) y corte transversal (II) de los panes con las mezclas C y C2, sin y con chía pre-hidratada.....	47
5	Corteza (I) y corte transversal (II) de panes con la mezcla H (alta en amaranto), con maíz amarillo, chía pre-hidratada, a diferentes niveles de hidratación (105-90%).....	48
6	Corteza (I) y corte transversal (II) de los panes con mezcla H2, con 0.6 y 1.2% de mucílago de chía.....	49
7	Apariencia de coricos de maíz (I) y coricos de la mezcla H2.....	50

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Matriz de diseño compuesto central rotatorio.....	31
2	Distribución de tamaño de las partículas de las harinas de maíz, amaranto y camote.....	37
3	Capacidad de retención de agua, humedad y proteína de las harinas de maíz, amaranto y camote.....	38
4	Composición proximal de las harinas en estudio.....	39
5	Fenoles totales y capacidad antioxidante de las harinas.....	40
6	Perfil de viscosidad de las harinas.....	41
7	Parámetros de textura de las masas preparadas con las mezclas.....	42
8	Significancia y coeficientes de regresión de los modelos de predicción.....	43
9	Mezclas óptimas obtenidas por el modelo de predicción.....	44
10	Composición proximal de los panes y coricos.....	50
11	Perfil de aminoácidos de los panes de trigo y de mezcla H2.....	51
12	Propiedades de textura del pan de trigo y del pan con harinas de maíz, amaranto y camote.....	52
13	Dureza de los coricos de harina de maíz amarillo y de harina H2.....	52
14	Contenido de fibra dietaria en los panes y coricos comparando los convencionales con los de harinas H2.....	53
15	Contenido de gluten en los panes de trigo y con harina H2 y en los coricos de harina de maíz y H2.....	54

RESUMEN

El trigo es sustento para la mayoría de la población occidental, pero algunos padecen por su ingestión. Por esto se comercializa pan sin trigo frecuentemente con baja calidad nutricional. Así, el objetivo fue elaborar productos de panificación con harinas de maíz, amaranto, camote naranja y chía, nutricional y tecnológicamente aceptables, que sean seguros para los intolerantes al trigo. Se prepararon harinas de amaranto y camote naranja y se adquirieron harinas de maíz nixtamalizado blanco y amarillo; se analizaron sus macronutrientes y propiedades fisicoquímicas. Se optimizaron mezclas por análisis de superficie de respuesta, usando los valores de dureza y cohesividad de la masa. Con las mezclas óptimas, se procedió a panificar, variando adición de agua, tiempos de amasado y fermentación, así como tiempo y temperatura de horneado. El método de superficie de respuesta fue muy útil para llegar a la mejor mezcla de harinas para la panificación. Utilizando las de maíz amarillo, amaranto y camote naranja, en proporciones de 57%, 34% y 9%, respectivamente (denominada mezcla H2), se obtuvo el pan con mejores características. Esto, mediante el proceso de mezclado directo, con 95% de agua y 1.2% de mucílago de chía y el resto de los ingredientes de acuerdo con los métodos convencionales. La fermentación más efectiva fue de 52 min y el horneado de 25 min a 210 °C. El pan obtenido presentó corteza uniforme, crujiente y dorada, así como miga homogénea, con un volumen específico de 41% del de pan de trigo y 60% de su tamaño. Con la mezcla óptima H2 se elaboraron coricos con una receta tradicional. El producto, presentó color más dorado que el corico de solo harina de maíz, así como una textura menos quebradiza. Tanto al pan como al corico se les analizaron composición proximal, perfil de textura, contenido de fibra dietaria y de gluten. El pan H2 presentó menos proteína que el de trigo (10.85 vs. 12.26% p.s.), pero con mejor aporte de aminoácidos indispensables como Leu y Lys. El contenido de grasa fue similar en ambos panes. Tanto el pan como el corico H2, presentaron un 2% más de fibra dietaria, que sus contrapartes convencionales. En cuanto a masticabilidad, el pan H2 fue similar al de trigo. Los coricos H2 estaban mucho más duros que los de solo maíz, pero comparables a galletas sin gluten. Los productos elaborados con harina H2 presentaron menos de 20 ppm de gluten, por lo que además de nutritivos, son seguros para quienes padecen intolerancias o alergias a las proteínas del trigo.

Palabras clave: pan sin trigo, panificación, maíz, amaranto, camote, chía.

ABSTRACT

Wheat is sustenance for most of the occidental population, but some suffer from its ingestion. Therefore, wheat-free bread is commercialized commonly with low nutritional quality. Thus, the aim of the study was to prepare products with flours of corn, amaranth, orange sweet potato and chia, nutritional and technologically acceptable and safe for whom suffer wheat-related diseases. Amaranth and sweet potato flours were prepared and white and yellow nixtamalized corn flours were purchased and analyze their macronutrients and physicochemical properties. Mixtures were optimized by the surface response method, using the hardness and cohesiveness values of the dough. Optimal mixtures were used to prepare bread, varying the addition of water, kneading and fermentation times, as well as the baking time and temperature. The response surface method was very useful in arriving at the best mixture of flours, with yellow corn, amaranth and sweet potato, in proportions of 57%, 34% and 9%, respectively (called blend H2), to obtain the bread with the best characteristics. This, through the direct mixing process, with 95% water and 1.2% chia mucilage and the rest of the ingredients according to conventional methods. The most effective fermentation lasts for 52 min and baking for 25 min at 210 ° C. The bread obtained presented a uniform, crunchy and golden crust, as well as a homogeneous crumb, with a specific volume of 41% of that of wheat bread and 60% of its size. With the optimal mixture H2, coricos were made with a traditional recipe. The product presented a darker golden color than corico made from only corn flour, as well as a less brittle texture. Both bread and corico were analyzed for proximal composition, texture profile, fiber and gluten content. H2 bread presented less protein than wheat bread (10.85 vs. 12.26% d.b.), but with a better supply of indispensable amino acids such as Leu and Lys. The fat content was similar in both breads. Both bread and corico H2 had 2% more dietary fiber than their conventional counterparts. In terms of chewiness, H2 bread was comparable to wheat bread. The H2 coricos were much harder than the corn-only ones, but comparable to gluten-free cookies. Products made with H2 flour had less than 20 ppm of gluten; therefore, in addition to their good nutritional quality, they are safe for those with intolerances or allergies to wheat proteins.

Key words: wheat-free bread, bread, corn, amaranth, sweet potato, chia.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando la humanidad era nómada, aprovechaba los nutrientes encapsulados en las cariósides de algunos pastos y elaboraba alimentos tipo pan. El hallazgo de cómo cultivar una de esas gramíneas, el precursor del trigo, originó asentamientos fijos, multiplicando la población. Con los avances tecnológicos como el uso de levadura, una molienda más fina y el cernido, el pan se volvió un alimento básico. En la actualidad el pan se consume a diario y está disponible ampliamente, con textura de recién hecho.

A pesar de su larga historia como alimento, el organismo humano no se ha adaptado por completo a la ingestión de trigo, por lo que es causa de patologías en algunas personas; tales son la enfermedad celiaca (EC), la sensibilidad no celiaca al trigo (SNCT) y las alergias a sus proteínas. La EC es una enteropatía autoinmune, con respuesta retardada al consumo de proteínas del trigo, en especial las del gluten (Ludvigsson *et al.*, 2013). Por su parte, la SNCT, tiene los mismos síntomas que la EC, y aunque es mediada inmunológicamente, no es autoinmune (Catassi *et al.*, 2013). Las alergias a diversas proteínas del trigo son respuestas inmediatas al contacto o la ingestión, a nivel respiratorio o gastrointestinal (Ludvigsson *et al.*, 2013).

Es un hecho que en los últimos años las patologías asociadas a la ingestión de trigo han aumentado, por lo que se han desarrollado los alimentos sin trigo (gluten), para quienes deben evitar el trigo. Dichos productos, en especial los de panificación, tienen varias limitaciones, aportan demasiada grasa y azúcar, son excesivamente caros, no aportan fibra dietaria y pueden contener aditivos que a veces dañan la mucosa intestinal de quienes padecen síntomas intestinales. Por esto, surge la pregunta, ¿cómo elaborar un producto de panificación de buena calidad nutricia y tecnológica, usando ingredientes de la cocina prehispánica que no incluía trigo?. Entre los ingredientes cuyo uso permanece desde edades remotas en nuestra cultura, están el maíz, el amaranto, el camote y la chía, ninguno de los cuales contiene gluten.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

2.1. El Pan Convencional con Harina de Trigo

El ser humano lleva consumiendo pan el doble del tiempo que lleva cultivando cereales. Se tienen pruebas de que al transcurrir la era Natufiense los humanos primitivos ya trituraban los granos de cereal silvestre que recolectaban y los mezclaban con agua para hacer pan (Arranz-Otaegui *et al.*, 2018). De esta manera arcaica, acondicionaban los nutrientes de los granos para procesarlos mejor. Los primeros granos que se utilizaron para estos panes fueron trigo sarraceno, cebada y avena, los cuales mezclaban con tubérculos de *Bolboschoenus glaucus* molidos. Aún desde ese tiempo observaron que el trigo proporcionaba un mejor cuerpo al pan, por lo que posteriormente se denominó pan al elaborado con harina de trigo.

Aun cuando se podría llamar pan a ese potaje que se hacía en tiempos prehistóricos, el pan como lo conocemos hoy se empezó a elaborar en el antiguo Egipto. Alrededor de 300 años AC, los egipcios observaron que, al dejar reposar la masa del pan, con el tiempo aumentaba su tamaño y que con esa masa se producía un pan más ligero y con mejor sabor. La levadura fue la primera gran contribución al pan moderno (Nielsen, 2019). Según Plinio (año 150 AC), al final de las Guerras Macedónicas, el pan leudado ya era un alimento básico en el Imperio Romano, con el que se pagaba salario de 1 kg a cada soldado enlistado (Faas, 1994).

En Mesopotamia mejoraron el proceso para moler el trigo; en lugar de hacerlo en los metates, se empezó a utilizar un sistema de dos piedras giratorias impulsadas por algún animal de carga o persona. Esto producía una harina más blanca y fina, la cual se destinaba para la clase alta; de ahí que en adelante el refinamiento de la harina demostraba el estatus social (Seoane-Viqueira, 1997). La harina sin refinar se usaba para elaborar los panes de los trabajadores manuales, que se hacían de granos más oscuros y que producían panes más compactos.

El último hito por el que pasó el pan ocurrió en 1917 gracias al invento de Otto Rohwedder, la rebanadora de pan. Antes, se compraban las hogazas enteras y se rebanaban de acuerdo con el uso que se les iba a dar, gruesas y con corteza para los emparedados de los trabajadores varones, mientras que delgadas y sin corteza para niños y mujeres. Con este invento, en menos de un año

más de la mitad de las hogazas ya se vendían rebanadas de fábrica (Lohman, 2012).

Estos son los principales hitos que marcaron la evolución del pan: blanco, esponjoso y rebanado para nuestra conveniencia. Por supuesto que hubo muchos más que fueron moldeándolo más sutilmente. Por ejemplo, la selección del tipo de grano con el que se elaboraría o el tipo de levadura que lo haría esponjoso más rápido. Así también se integraron los aditivos necesarios para conservar las características de recién horneado, desde la fábrica hasta el consumidor (Di Cagno *et al.*, 2008).

2.2. Enfermedades Asociadas a la Ingestión de Trigo

Mientras para la mayoría de las personas los alimentos de trigo, como el pan, son algo delicioso de consumo cotidiano, para algunos, son causa de enfermedades. Una de éstas, es la enfermedad celiaca (EC), una enteropatía crónica autoinmune, debida a la ingestión de las proteínas del trigo, en especial las que conforman el gluten, en aquellos con susceptibilidad genética. Ésta, se da por el antígeno leucocitario humano HLA-DQ2 y/o HLA-DQ8, aunque más del 30% de cualquier población tiene esta genética, solo el 1% desarrolla EC. Esta enfermedad afecta el intestino delgado ocasionando inflamación, daño de las vellosidades y, por tanto, malabsorción, heces sueltas, flatulencias, diarreas y distensión abdominal (Abadie *et al.*, 2011).

La EC también puede inducir síntomas extraintestinales, como dolor de cabeza, problemas nerviosos, dermatitis, artritis, neuropatía periférica y anemia. Incluso, puede no haber ninguna de estas manifestaciones que den sospecha de padecer EC (Remes-Troche *et al.*, 2018). Por ejemplo, hay casos en los que solo se observa retardo en el crecimiento de los niños, a causa de la EC.

El diagnóstico de la EC se basa no solo en los síntomas, sino en la evaluación de la morfología de la mucosa intestinal y en pruebas serológicas, para detectar anticuerpos contra el autoantígeno, la transglutaminasa tisular (Lindfors *et al.*, 2019). De hecho, primero se debe hacer una prueba para cuantificar anticuerpos IgA anti-transglutaminasa tisular. En niños menores de 2 años con síntomas sugerentes de EC, dicha prueba no es positiva, por lo que se cuantifican anticuerpos IgG e IgA contra péptidos de gliadinas. En adultos, la biopsia de duodeno es indispensable para confirmar el diagnóstico de EC y establecer la gravedad del daño a la mucosa (Ludvigsson *et al.*, 2013).

La biopsia intestinal es el estándar de oro para diagnosticar EC ya que se hace una evaluación

microscópica del estado de las vellosidades del intestino delgado y de si hay recuperación con el tratamiento. La toma de biopsia es muy invasiva y debe ser interpretada por personal con experiencia para evitar errores (Oberhuber *et al.*, 1999). Las alteraciones histológicas deben evaluarse e informarse de manera sistemática, empleando clasificaciones validadas (Remes-Troche *et al.*, 2018).

Otro tipo de respuesta anómala a la ingestión de trigo, son las alergias, En niños pequeños, se dan respuestas inmunes inmediatas a la ingestión de trigo, que, por lo común, se superan al crecer. Algunas alergias están ligadas a IgE y otras a eosinófilos (Ludvigsson *et al.*, 2013). Hay otro tipo de alergia a las proteínas del trigo, por vía respiratoria, como la rinitis llamada asma del panadero; así como otras tan graves como la anafilaxis inducida por ejercicio, posterior a ingerir trigo.

Las alergias al trigo y la EC se conocen desde hace mucho tiempo y los mecanismos asociados están dilucidados. En la última década, ha aparecido una nueva entidad, la sensibilidad no celiaca al trigo (SNCT), con síntomas idénticos a los de la EC, pero sin producción de anticuerpos contra la transglutaminasa tisular. Como se desconoce su mecanismo, no hay marcadores biológicos para detectarla. Lo que es un hecho es su origen inmune, donde algunos autores solo involucra la inmunidad innata, mientras para otros, también hay inmunidad adaptativa (Catassi *et al.*, 2015).

Se sabe hoy tanto de la SNCT como se sabía de la EC hace 50 años. El protocolo de diagnóstico es algo complicado de realizar y desde luego, no es apto para estudios epidemiológicos, que puedan ayudar a estudiar la prevalencia de la condición. Se necesitan criterios de diagnóstico específicos para optimizar el cuidado clínico y evitar el autodiagnóstico (Reig-Otero *et al.*, 2017).

Una vez diagnosticadas la EC, SNCT o las alergias, el tratamiento por excelencia es el de excluir productos de trigo de la dieta. Esta estrategia ha propiciado que se consuman más carbohidratos simples y menos fibra dietaria, además de un aporte de minerales deficiente (Wild *et al.*, 2010). Así mismo, los productos diseñados para pacientes con EC incluyen aditivos que en muchas ocasiones exacerban los síntomas intestinales, porque afectan la mucosa intestinal de por sí inflamada (De Giorgio *et al.*, 2016).

2.3. Panificación con Mezclas de Diversas Harinas

La estrategia para obtener productos aptos para el consumo de personas con enfermedades

asociadas al trigo, es sustituirlo en los productos de panificación. Los sustitutos deben tener la capacidad del gluten del trigo de formar redes para retener el dióxido de carbono producido durante la fermentación (Gallagher *et al.*, 2004). Sin esta red no habría estructura para organizar los gránulos de almidón y la fibra dietaria, obteniendo como resultado un producto con una miga nada parecida a la que el gluten produce.

El desarrollo de productos panaderos sin trigo, por lo común llamados “sin gluten” o “libres de gluten”, involucra el uso de harinas de arroz, sorgo, avena, trigo sarraceno, amaranto, quinua, teff y maíz. Éstos, se mezclan con almidones, proteínas lácteas o de otro origen, gomas, hidrocoloides y otros ingredientes funcionales. Para elaborarlos, se aplican tecnologías alternativas, tales como fermentación con masas madres, proceso enzimático y proceso a altas presiones hidrostáticas (Zannini *et al.*, 2011).

2.3.1. Con Gluten

En 1948, Finney y Barmore encontraron una correlación positiva entre el contenido de proteínas de la harina de trigo y el volumen de pan. Posteriormente, se observó que el volumen de pan depende en mayor medida de la calidad de las proteínas de la harina que de la cantidad en sí. Debido a esto se les empezó a llamar: proteínas formadoras de gluten y proteínas que no forman gluten. Las proteínas formadoras de gluten se denominan también proteínas de almacenamiento, son 80-85% del total; el resto, no forman gluten (Sciarini *et al.*, 2016).

Las proteínas que integran el gluten se encuentran localizadas en cuerpos proteicos en el endospermo del grano. Durante el amasado, se produce la ruptura de estos cuerpos y su hidratación, formando una red tridimensional continua en donde se encuentra embebido el almidón. Dicha red, es el gluten, una mezcla compleja de proteínas que varían en su proporción, estructura y propiedades. Así, el gluten es la clave estructural del pan (Sciarini *et al.*, 2016).

Hasta cierto grado, se puede sustituir parcialmente la harina de trigo, con otros ingredientes, sin perder la calidad del producto final. Ejemplo son los panes de trigo con yuca, taro y calabaza (Igbabul *et al.*, 2014). Sustituir la harina de trigo por completo, es un reto en panificación.

2.3.2. Sin Gluten

La mayoría de los productos de panificación sin gluten, fueron y aun son algunos, elaborados a partir de almidones nativos o modificados mezclados con diferentes hidrocoloides. Esto, con el propósito de imitar las propiedades viscoelásticas del gluten, con el fin de obtener productos semejantes al pan. Los estudios realizados en esta temática correlacionan los parámetros de la textura del pan con la consistencia de la masa y la retrogradación de los almidones. Sin embargo, el valor nutritivo de estos productos es muy limitado, ya que solo se enfocan a reproducir las propiedades estructurales del pan (Matos y Rosell, 2015).

Actualmente, se producen algunos panes de quinua, amaranto, garbanzo, maíz, soya y camote, con buena calidad nutricia, así como características sensoriales aceptables (Machado-Alencar *et al.*, 2015; Vilmane y Straumite, 2014; Wanjuu *et al.*, 2018). Hay diferentes estudios publicados sobre productos de panificación sin trigo, elaborados con amaranto, maíz, soya y camote (Julianti *et al.*, 2017; Calderón de la Barca *et al.*, 2010; Tadesse *et al.*, 2015). No hay alguno elaborado con la combinación de harinas de maíz, amaranto y camote naranja, que aportan proteína de buena calidad, β -carotenos y otros antioxidantes, así como fibra dietaria.

2.3.3. Componentes Básicos del Pan

Los almidones, el agua y las proteínas, son los componentes básicos del pan convencional hecho de trigo. En el pan sin trigo y por tanto sin gluten, también son componentes básicos.

2.3.3.1. Almidones. Éstos, son ampliamente utilizados por la industria alimentaria para gelificar, espesar, retener la humedad, emulsionar, formar películas y texturizar. En la masa, absorben agua y contribuyen significativamente a la textura, apariencia y aceptabilidad general de los productos horneados (Miyazaki *et al.*, 2006; Ward y Andon, 2002). En términos de estructura, pueden actuar como relleno inerte en la matriz continua de la masa (Bloksma, 1990) o ser parte de una red de proteína y almidón (Eliasson y Larsson, 1993). La gelatinización del almidón podría jugar un papel

importante en la formulación libre de gluten, esto debido a la capacidad de las pastas de almidón para atrapar las burbujas de aire que ayudan a la retención de gas. Por lo tanto, los almidones formadores de gel, como los almidones pregelatinizados y estabilizadores de células de aire, como las gomas, son el medio para retener el gas (Gallagher, 2009).

En el pan sin trigo se usan los almidones de maíz, yuca, camote, papa, sorgo, cebada y arroz. El almidón aislado del trigo no se recomienda porque muchos pacientes celíacos son sensibles hasta a rastros de gliadinas (Lohiniemi *et al.*, 2000). El almidón de arroz es un ingrediente básico en el pan sin trigo debido a su bajo contenido de sodio y alta digestibilidad (Gallagher *et al.*, 2003). Los almidones de maíz y tapioca pueden impartir sabores inusuales al pan (Sánchez *et al.*, 2002). Se requieren estudios adicionales para comprender mejor el impacto de los diferentes tipos de almidón y sus propiedades funcionales en el pan sin trigo.

2.3.3.2. Agua. El agua afecta el comportamiento reológico de las masas y la calidad de los panes sin trigo (Arendt *et al.*, 2008). La expansión de la masa y la retención de gas requieren elasticidad de la red de proteína, almidón y agua. Si la proporción de agua es demasiado baja, la masa se vuelve quebradiza e inconsistente y presenta un marcado efecto de corteza debido a la rápida deshidratación en la superficie. Si la proporción de agua es demasiado alta, la viscosidad de la masa es baja, resultando en poca o ninguna resistencia a la deformación, por lo tanto, no hay extensibilidad ni desarrollo (Arendt *et al.*, 2008).

La gelatinización del almidón y otras reacciones que ocurren durante la cocción son afectadas por el agua. El agua gobierna la suavidad de la miga, la textura crujiente de la corteza, la vida útil y otras propiedades (Wagner *et al.*, 2007). Las formulaciones de pan sin trigo con 10% a 20% de agua adicional, resultan en un mayor volumen de pan, corteza más suave y mejor textura de miga (Gallagher *et al.*, 2003; McCarthy *et al.*, 2005). Por lo tanto, el contenido de agua puede ser factor clave que controle el volumen y firmeza de la miga en el pan.

2.3.3.3. Proteína. En el pan de trigo, las proteínas del gluten son las que forman la red que da las características deseables a la masa y resulta en la formación de una miga uniforme. En el pan sin trigo, conformado principalmente de diversas fuentes de almidón, hacen falta proteínas para aportar las características buscadas, por lo que se utilizan fuentes alternativas de proteínas aisladas, como aditivos, cuyas fuentes y propiedades se explican en la siguiente sección.

2.3.4. Aditivos

En los productos de panificación comerciales tanto con gluten como sin gluten, se utilizan diversos aditivos alimentarios, para aportar propiedades tecnológicas, aumentar calidad nutricia, aspecto o sabor.

2.3.4.1. Productos lácteos. En los productos horneados, los ingredientes lácteos mejoran el sabor, el color de la corteza y la textura. Así también, reducen el proceso de rancidez e incrementan la absorción de agua, por lo tanto, mejoran las propiedades de manejo de las masas (Arendt *et al.*, 2008). Así, los panes sin gluten con lácteos añadidos, tienen estructuras reticulares que se asemejaban a aquellas del pan tradicional de trigo. Sin embargo, cuando la mucosa intestinal se daña por EC, no siempre recupera la actividad de la lactasa y algunos enfermos celíacos son intolerantes a la lactosa, lo que puede limitar la aceptación de estos productos (Bode y Gudmand-Hoyer, 1998).

2.3.4.2. Proteínas de huevo. Las proteínas del huevo forman películas fuertes, cohesivas y viscoelásticas, esenciales para un espumado estable (Ibanoglu y Ercelebi, 2007) y una mejor retención de gas (Jonagh *et al.*, 1968). Los panes sin trigo que utilizan al mismo tiempo proteínas de huevo y la transglutaminasa microbiana, tienen buena capacidad de retención de agua y forman una red proteica similar a la del pan de trigo. El pan resultante muestra menor pérdida de peso durante el horneado y mayor humedad de la miga, finura, ligereza y homogeneidad (Moore *et al.*, 2006). Sin embargo, la transglutaminasa microbiana no se debe utilizar en los productos de panificación para enfermos celíacos, debido a que tiene actividad análoga a la transglutaminasa tisular, clave en la patogénesis de la EC (Cabrera-Chávez *et al.*, 2009).

2.3.4.3. Proteína de soya. Esta fuente se ha usado para mejorar la calidad nutricia de los cereales, pero la principal aplicación es para mejorar el comportamiento mecánico de la masa y la calidad de textura final del pan durante el almacenamiento (Ribotta *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2004). Los niveles altos de proteína de soya disminuyen severamente la calidad del pan sin trigo. Una pequeña cantidad de soya (0.5%) agregada a la formulación de almidón de maíz, almidón de yuca y harina

de arroz, aumenta el volumen del pan y le da a la miga una textura más uniforme y mejores cualidades sensoriales (Sánchez *et al.*, 2002). Así, las proteínas de soya en baja proporción, son adecuadas para formular pan sin trigo, ya que pueden superar los problemas de la miga.

2.3.4.4. Hidrocoloides. Los hidrocoloides y las gomas son polisacáridos hidrofílicos de cadena larga y alto peso molecular, provenientes de plantas, algas y fuentes microbianas u obtenidos por tratamiento químico de celulosa (Dickinson, 2003). Por lo general, tienen propiedades coloidales y son capaces de producir geles en sistemas acuosos (Hoefler, 2004). Son muy utilizados en el pan sin trigo, para aportar las propiedades tecnológicas del gluten (Gallagher *et al.*, 2004; Gujral y Rosell, 2004; Lazaridou *et al.*, 2007; Lee y Lee, 2006; Schober *et al.*, 2008; Toufeili *et al.*, 1994). Su funcionalidad depende de la fuente, el proceso de extracción y la interacción con otros polímeros e ingredientes alimentarios; entre las más comunes en el pan sin trigo, están la hipromelosa y la goma de xantana (Anton y Artfield, 2008; Huttner y Arendt, 2010). Se debe considerar que algunos aditivos emulsificadores, pueden afectar la mucosa intestinal de los pacientes con inflamación intestinal, como los enfermos celiacos y los que padecen sensibilidad no celiaca al trigo.

2.4. Potencialidad del Amaranto, Camote, Maíz y Chía

La más clara semejanza entre las dietas de los conquistadores españoles y los nativos mexicanos era la preferencia por los cereales. Los españoles trajeron semillas de trigo e insistieron en que los indios aprendieran a plantar y atender el cultivo. A los españoles no les parecía completa la comida sin pan de trigo; desdeñaban el maíz como alimento inferior de los nativos, los campesinos, y los animales. Los nativos mexicanos no vieron razón para preferir el trigo sobre el maíz, e incluso hoy el maíz es su alimento básico.

Además del maíz, el camote, el amaranto y la chía eran ampliamente consumidos entre los habitantes amerindios antes de la conquista. Estos cuatro ingredientes se han utilizado en estudios de elaboración de pan libre de gluten, aunque no en forma combinada.

2.4.1. Amaranto

El amaranto es una buena elección como ingrediente en la panificación para quienes padecen por la ingestión de trigo, El almidón del amaranto tiene unas cualidades inusuales, incluyendo una excelente estabilidad al congelado-descongelado y a la retrogradación, además de alta temperatura de gelatinización. Así mismo, presenta valores altos de viscosidad, de capacidad de unir agua y de poder de hinchamiento (Baker y Rayas-Duarte, 1998; Hunjai *et al.*, 2004).

Según Aufhammer (2000), la calidad de horneado del amaranto es pobre, no se forma una red como la que induce el gluten. Sin embargo, la aplicación de la tecnología de masa madre ha hecho masas de amaranto con una viscoelasticidad similar a la de trigo. Esto debido a las bacterias productoras de ácido láctico y a la mayor actividad enzimática en el ambiente ácido generado durante la fermentación con masa madre (Houben *et al.*, 2010). Quizá en los estudios citados trabajaron con grano de amaranto; sin embargo, en el mercado mexicano está disponible el amaranto reventado a manera de palomitas de maíz. Así, con la combinación de harina de amaranto reventado con harina de grano crudo, se obtuvieron características muy aceptables de pan sin trigo (Calderón de la Barca *et al.*, 2010).

2.4.2. Camote

El consumo de camote se ha asociado positivamente con la salud humana. Procesar el camote en harinas no solo prolonga su vida útil, sino que también la hace viable para formulaciones de productos de valor agregado, para uso en sistemas alimentarios humanos. La harina de camote podría ser comercializada como una alternativa de bajo costo y "saludable" en lugar de la de trigo. El camote se ha usado como sustituto de harina de trigo para aumentar el aporte de provitamina A de algunos productos en África (Kidane *et al.*, 2013). Los componentes del camote no pueden formar una red que ayude a la retención del gas formado en la fermentación, por lo que la miga del pan con solo camote es ligera y quebradiza (Wanjuu *et al.*, 2018).

2.4.3. Maíz

El maíz (*Zea mays*) y el almidón de maíz se han usado en productos libres de gluten adicionando goma xantana para formar la red. El pan resultante tiene buen volumen específico, pero muestra una estructura de miga gruesa y muy poco sabor (Christianson *et al.*, 1974). Acs *et al.* (1996 a, b), además de goma xantana, utilizaron otros tipos de gomas en formulaciones de pan basadas en almidón de maíz, para incrementar el volumen de la hogaza y suavizar la estructura de la miga. Una mezcla de 72.4% de almidón de maíz, 17.2% harina de arroz, 8.6% almidón de yuca y 0.5% harina de soya, resultó en un pan libre de gluten con buen volumen y estructura de miga (Sánchez *et al.*, 2002).

El maíz, aunque no contiene gluten como tal, presenta zeínas que son proteínas solubles en alcohol, análogas a las gliadinas del trigo, aunque en baja concentración. Una vez aisladas, las zeínas tienen buenas propiedades para añadir al pan sin gluten (Schober *et al.*, 2008), que combinadas con almidón y agua forman masas viscoelásticas muy parecidas a las del trigo (Lawton, 1992). Para ganar volumen, se agregan hidrocoloides, como hipromelosa (Andersson *et al.*, 2011; Schober *et al.*, 2008). Esto mejora su capacidad de agregación por aumentar la absorción de agua (Schober *et al.*, 2010).

Las zeínas podrían aplicarse en nuevas recetas o diferentes condiciones de procesamiento, para mejorar la reología de la masa y el rendimiento de horneado. Sin embargo, podrían no ser apropiados tales productos para los enfermos celíacos, ya que se ha probado que, en algunos pocos casos, se da respuesta inmune análoga entre zeínas del maíz y gliadinas del trigo, aunque de menor intensidad (Ortiz Sánchez *et al.*, 2016; Cabrera Chávez *et al.*, 2008).

2.4.4. Chía

Ya hay productos de panificación con trigo que incluyen chía. Algunos estudios han publicado información acerca del comportamiento de la masa y aceptabilidad organoléptica del producto, con sustitución de 5 % de harina del grano integral de chía (Iglesias-Puig y Haros, 2013). Las semillas

de chíá no solamente son atractivas por su perfil nutricional, sino que también por su propiedad de exudar mucílago cuando entra al contacto con el agua. Este mucílago muestra una alta capacidad para absorber agua que puede ser utilizada en la industria de alimentos o farmacéutica (Muñoz *et al.*, 2013).

2.4.5. Aporte de Nutrientes

El amaranto es una buena fuente de minerales; contiene calcio, magnesio, hierro y zinc en niveles 5.2-, 2.9-, 2.8- y 1.3 veces más altos, respectivamente, que en la harina de trigo sin fortificar. Además, las proporciones y calidad de proteína y lípidos en la harina integral de amaranto son superiores a las de harina de trigo integral (Álvarez-Jubete *et al.*, 2010). Su perfil de aminoácidos es similar al de las proteínas de origen animal, y su buen aporte de lisina representa un alto valor biológico, para pan de alta calidad nutricia (Yáñez *et al.*, 1994). Los lípidos en el amaranto tienen alta proporción de ω -6 y son ricos en tocotrienoles y escualeno, que son compuestos que participan positivamente para reducir el colesterol de lipoproteínas de baja densidad. Es también una buena fuente de fibra dietaria. Sin embargo, los granos enteros contienen cantidades significativas de ácido fítico, un inhibidor de la absorción de hierro y otros minerales (Hurrell, 2003).

Por su parte, el camote es rico en almidón, vitaminas, minerales y fibra dietaria, mientras que la proteína y su contenido de lípidos son relativamente bajos. Algunas variedades de camote contienen compuestos bioactivos tales como polifenoles y β -caroteno. El consumo de camote se ha asociado con una serie de beneficios para la salud, como el de antioxidante, efectos antitumorales, antiinflamatorios y antidiabéticos. Tanto es así, que ha aumentado el interés por desarrollar alimentos a base de camote para el consumo humano (Wang *et al.*, 2016). Este tubérculo contribuye poco al valor energético de los productos, debido a su baja proporción de carbohidratos simples; mientras, que tiene buen aporte de fibra dietaria (Aina *et al.*, 2009).

En cuanto al maíz, es una fuente importante de alimento para gran parte de la población mundial y representa un vehículo para la intervención contra la deficiencia de vitaminas y minerales. Muchos productos de los procesos industriales de molienda de maíz también pueden producirse a pequeña escala, así como en el hogar. Para esto, es importante considerar que los nutrientes que se eliminan

o alteran a través del procesamiento en el hogar o en la pequeña industria, puede variar ampliamente (Gwirtz y García-Casal, 2014). La nixtamalización del maíz, además de mejorar la funcionalidad de la masa, aumenta el contenido de calcio del producto (Vega-Rojas *et al.*, 2017).

El consumo de chía provee numerosos beneficios a la salud, tales como altos contenidos de lípidos, en especial los insaturados ω -3 y ω -6, proteínas y péptidos bioactivos, antioxidantes, minerales y fibra dietaria (Ixtaina *et al.*, 2008).

2.4.6. Propiedades Tecnológicas de la Harina

La producción comercial de harina de camote requiere del pelado de los tubérculos para aumentar la calidad de la harina. Esta práctica provoca pérdidas y produce cáscaras como subproductos. Según Van Hal (2000), la pérdida debida a la exfoliación oscila entre el 11.4 y 23% del camote total, según los métodos de pelado y el tamaño. Además, se pierden nutrientes en las cáscaras, que son componentes bioactivos, como polifenoles y fibra dietaria. Por lo tanto, evitar el proceso de pelado no solo reduce el tiempo de procesamiento, sino que también aumenta el perfil nutricional para las aplicaciones de salud humana. Sin embargo, la calidad de la harina de camote con cáscara aún no se ha estudiado, para proporcionar una base para la formulación de productos alimenticios saludables.

Basado en los valores de pH registrados en el estudio de Koua *et al.* (2018), las harinas de camote se podrían usar fácilmente en la industria de pastelería y panadería debido a su pH que indicaría niveles de seguridad del almidón. El pH es un parámetro importante en la determinación de la calidad de la harina. Un pH menor a 4 indica un nivel apreciable de fermentación y por lo tanto ruptura del almidón. La fermentación también le proporciona el aroma y sabor característico a la harina y la hace poco deseable para integrarse a productos horneados (Apea-Bah *et al.*, 2011).

La masa obtenida de harina de maíz es una mezcla constituida por los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) mezclados con gránulos parcialmente gelatinizados, gránulos intactos, partes de endospermo y lípidos. Todos estos componentes forman una malla compleja heterogénea dentro de una fase acuosa continua (Gómez *et al.*, 1987). Además, la reasociación de la amilosa y amilopectina, que dependen del tiempo y la temperatura, modifica el contenido total de agua

(Pflugfelder *et al.*, 1988) y su distribución dentro de esta matriz. Este proceso tiene la mayor repercusión en las propiedades reológicas y de textura de los productos elaborados. Durante la nixtamalización, se gelatinizan pequeñas cantidades de gránulos de almidón. La mayor gelatinización se da por la fricción durante la molienda, donde se dispersan parcialmente los gránulos hinchados dentro de la matriz, actuando como pegamento que mantiene unidas las partículas de masa.

Desde el punto de vista tecnológico, el componente más importante de las semillas de chía es el contenido de fibra dietaria, que incluye polisacáridos en un mucílago de alto peso molecular ($0.8-2 \times 10^6$ Da), un poderoso efecto espesante y una alta capacidad de retención de agua (Vázquez-Ovando *et al.*, 2009). Se ha propuesto que la estructura de la unidad básica del mucílago es un tetrasacárido con residuos 4-O-metil- α -D-glucopiranosil que ocurre en las ramificaciones de b-D-xilanopiranosil en la cadena principal (Lin *et al.*, 1994). Iglesias-Puig y Haros (2013), observaron cómo este compuesto podría mejorar el volumen de la masa debido a la formación de complejos hidrofílicos entre sus grupos iónicos y las proteínas como el gluten, lo que favorece la formación de la matriz de gluten. Por estas razones, las semillas de chía presentan características interesantes para su evaluación y uso en productos de panificación (Moreira *et al.*, 2013).

2.5. Productos Libres de Gluten Disponibles en el Mercado

El mercado de productos libres de gluten está creciendo mucho, ya que la prevalencia de la enfermedad celiaca y trastornos asociados al trigo, parecen ir en aumento. Sin embargo, la cantidad de alimentos disponibles es todavía limitada y de poca calidad (Rostami *et al.*, 2017). Pero la popularidad que ha recibido tanto de personas con enfermedades asociadas a la ingestión de trigo como las que no, ha hecho que aumente su oferta, así como su contenido nutricional. Los productos sin gluten no son recomendables para la población en general ya que no hay evidencia que tengan algún efecto positivo en las personas sanas y sí pueden afectar la nutrición (Tortora *et al.*, 2015). Los efectos negativos asociados a los productos sin gluten son sus más altos contenidos de lípidos, azúcares y sal, que sus contrapartes con gluten. Así, su consumo frecuente puede producir deficiencias nutricionales y hasta síndrome metabólico (Tortora *et al.*, 2015). La educación es un

factor clave para lograr un equilibrio dietario saludable. Un profesional de la salud debe evaluar periódicamente la dieta de las personas con EC, para evitar riesgos nutricionales.

Un aspecto importante de las dietas sin gluten es el costo de los productos etiquetados “sin gluten”. Luna-Alcocer (2018) reporta que, en la ciudad de Hermosillo, Sonora, se encontraron 71 productos libres de gluten en diversos establecimientos. Sus precios llegaron a ser hasta 539% más caros que los productos elaborados con trigo. Esto, representa un reto para personas con escasos ingresos, aunque siempre hay la opción de aprender algo de cocina y otro poco de ciencia y elaborar los propios alimentos sin trigo.

3. HIPÓTESIS

Es posible elaborar productos de panificación con ingredientes de la cocina mexicana: maíz, amaranto, camote y chía, tecnológicamente aceptables, con buena calidad nutricia por su aporte de proteína, fibra dietaria y antioxidantes, así como seguros para personas a quienes afecta la ingestión de trigo.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Elaborar productos de panificación sin trigo, a base de harinas de maíz, amaranto, camote y chía, que sean tecnológicamente aceptables, que aporten proteína de buena calidad, fibra dietaria y antioxidantes, así como seguros para personas a quienes afecta la ingestión de trigo.

4.2. Objetivos Particulares

Procesar amaranto reventado y camote naranja, para mezclar con harina de maíz nixtamalizado comercial. Evaluar sus características físicas, químicas y nutricias.

Optimizar las combinaciones de harinas de maíz, amaranto y camote, para obtener las propiedades de panificación adecuadas.

Elaborar productos de panificación con las mezclas óptimas, usando chía como aditivo y evaluar su calidad tecnológica, contenido de proteína y aminoácidos, fibra dietaria y gluten.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

Se adquirieron camotes naranjas del comercio local, amaranto reventado y chía de Productores Unidos de Puebla y harina de maíz nixtamalizado comercial. Todos los ingredientes fueron grado alimenticio y los reactivos químicos de grado analítico.

5.2. Obtención y Caracterización de Harinas

Los camotes se pelaron y cortaron con una rebanadora de disco giratorio (Torrey RB-300), de un grosor de 1.6 ± 0.6 mm, las hojuelas se blanquearon en agua hirviendo por 1.5 min y se secaron en un horno a 60 °C por 24 h (Koca *et al.*, 2005; Ndawula *et al.*, 2004). Posteriormente, se molieron en un molino Pulvex 200 con un tamaño de malla de 250 μ m (Molinos Pulvex, Ciudad de México) hasta obtener harina para panificación. El amaranto reventado se molió y tamizó en un cernidor rotatorio (Mod. DT168, Advanced Manufacturing, New Berlín, Wisconsin), hasta la obtención de harina.

A las harinas obtenidas, así como a la de maíz nixtamalizado, se les evaluó, de acuerdo a las técnicas de la AACC (2000), la distribución del tamaño de partículas (55-30.01), capacidad de absorción de agua (56-60.01), humedad (44-16.01), proteína (46-12.01), grasa (30-10.01) y ceniza (08-01.01).

5.3. Análisis de Fenoles Totales y Actividad Antioxidante

Los β -carotenos se cuantificaron por HPLC, los fenoles totales se extrajeron y estimaron por el

método de Folin-Ciocalteu, de acuerdo a Singleton y Rossi (1965). Para evaluar la capacidad antioxidante se usaron los métodos de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) de acuerdo a Brand-Williams *et al.* (1995), ORAC (capacidad de absorción de oxígeno radical) de acuerdo a Ou *et al.* (2001) y TEAC (capacidad antioxidante de equivalentes Trolox), de acuerdo con Re *et al.* (1999).

5.4. Optimización de las Mezclas

Se siguió un diseño compuesto central rotatorio 2^3 usando el método de superficie de respuesta, para determinar las mezclas de harinas de amaranto, camote y maíz, que teóricamente cumplan con las características apropiadas para generar un volumen específico aceptable. Para la harina de maíz (X_1) el rango de inclusión en las mezclas fue de 50 a 70%, para la harina de amaranto (X_2) el rango de 10 a 30% y para la harina de camote (X_3) 5 a 10%. Las corridas experimentales generadas por el diseño, con los valores obtenidos de los niveles de los factores estudiados, se muestran en el Cuadro 1. Los valores de las mezclas 15 a la 19, representan las repeticiones en el origen del diseño, para darle rotabilidad al modelo y generar el error experimental. El diseño experimental y el método de superficie de respuesta, se usaron para optimizar los parámetros de textura: dureza y cohesividad de las harinas obtenidas. Las mezclas se codificaron y se prepararon para su análisis reológico y de calidad.

5.5. Perfil Viscoamilográfico de las Harinas y Análisis Reológico de las Masas

Se analizaron las características de cocimiento-enfriamiento de las harinas con un analizador de viscosidad (RVA Super 4 Newport Scientific, Australia) usando 3.5 g de harina en 25 mL de agua, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Las muestras se colocaron en el recipiente de aluminio y se inició la prueba manteniendo la suspensión a 50 °C por 1 min, se calentó a 95 °C a una tasa de 12 °C/min, se mantuvo a 95 °C por 2.5 min, se enfrió a 50 °C a una tasa de 12 °C/min, se mantuvo a 50 °C por 2.5 min. La rotación de la paleta introducida en el recipiente se mantuvo

durante la prueba en 160 rpm. Los parámetros evaluados fueron viscosidad pico, caída de viscosidad o breakdown, retroceso o setback y viscosidad final. El breakdown es la caída de viscosidad durante el cocimiento y el setback es el incremento de viscosidad durante el enfriamiento.

Las condiciones de amasado se determinaron con el método 54-40A de la AACC (2000) en un mixógrafo (National Manufacturing Co., Lincoln, NE). En base a los mixogramas obtenidos, se determinó el tiempo de desarrollo de la masa y la estabilidad durante el amasado.

Cuadro 1. Matriz de diseño compuesto central rotatorio.

Mezcla	Maíz	Amaranto	Camote
1	72.97	18.92	8.11
2	76.74	16.28	6.98
3	62.79	30.23	6.98
4	67.35	26.53	6.12
5	70.13	18.18	11.69
6	74.16	15.73	10.11
7	60.67	29.21	10.11
8	65.35	25.74	8.91
9	64.52	25.81	9.68
10	71.79	20.51	7.69
11	77.42	12.90	9.68
12	61.54	30.77	7.69
13	70.59	23.53	5.88
14	66.67	22.22	11.11
15	68.57	22.86	8.57
16	68.57	22.86	8.57
17	68.57	22.86	8.57
18	68.57	22.86	8.57
19	68.57	22.86	8.57

5.6. Extracción del Mucílago de Chía

La extracción del mucílago de chia se hizo con la técnica de Muñoz *et al.* (2012). Se hidrataron semillas de chia con agua (20 mL/g) a 80° C durante 2 h con agitación constante. Se liofilizó la mezcla y se separó el mucílago de las semillas en un cernidor rotatorio (Mod. DT168, Advanced Manufacturing, New Berlin, Wisconsin), usando malla de 425 µm.

5.7. Condiciones de Panificación y Evaluación de los Productos

La elaboración de pan se realizó con el método de masa directa, 10-09 de la AACC (2000) con algunas modificaciones. Se utilizó como referencia el pan de trigo, con la siguiente formulación: harina de trigo (100 g), sal (2 g), levadura (2 g), azúcar (6 g), manteca vegetal (3 g) y agua (61 mL). En los panes elaborados con las mezclas de harinas de maíz, amaranto y camote, se modificó la cantidad de agua a agregar, se añadió mucílago de chia (0.6 o 1.2 g), se mezcló por 8 min, moldeando inmediatamente después del mezclado, con un tiempo de fermentación de 45 min. Finalmente, se hornearon a 200 °C por 25 min. Se probaron diferentes tiempos de mezclado, de fermentación y horneado; así como diferentes niveles de hidratación de las masas.

Los coricos se elaboraron con harina de maíz amarillo (100 g), huevo (9 g), manteca vegetal (40 g), azúcar (40 g), polvo para hornear (1.5 g), vainilla (1.5 mL), sal (1.5 g) y agua (12 mL), para utilizarlos como referencia. Así mismo, se sustituyó la harina de maíz por la mezcla de harinas de maíz, amaranto y camote (H2). Se mezclaron todos los ingredientes hasta que estuvieron bien incorporados, se formaron los coricos y se hornearon a 180 °C por 20 min.

5.7.1. Volumen Específico

Se midió el peso y el volumen de los panes después del horneado según el método 10-09 de la

AACC (2000). Para esto, se introdujo el pan a un cilindro marcado con un volumen fijo de semillas, se volvió el volumen fijo de semillas a verter en el cilindro y se midió el volumen desplazado. Posteriormente, se pesó el pan y se calculó el volumen específico (cm^3/g) mediante la división del volumen (cm^3) obtenido entre el peso (g).

5.7.2. Análisis Proximal

Se analizó la composición proximal de los panes y de los coricos por los métodos de la AACC (2000). Se determinó proteína (46-12.01), grasa (30-10.01), humedad (44-15.01) y ceniza (08-01.01). Los carbohidratos fueron calculados por diferencia.

5.7.3. Análisis de Textura

Se analizó el perfil de textura del pan utilizando el analizador de textura TA.XT2 (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido). Se utilizó una sonda cilíndrica de 25 mm de diámetro en una doble compresión, penetrando 7.5 mm a una velocidad de 1.7 mm/s con 5 s entre la primera y segunda compresión, el umbral de fuerza 1 N. La fuerza (N) requerida para penetrar la muestra se registró como la firmeza del pan. Otros parámetros evaluados mediante esta prueba fueron la elasticidad, cohesividad, gomosidad, masticabilidad y resiliencia del pan. La medición se hizo en la parte central de tres rebanadas de 15 mm de dos panes por muestra. La fuerza de ruptura (N) de los coricos se obtuvo por compresión en una prueba de tres puntos utilizando el aditamento indicado para esta prueba. La velocidad de prueba fue 1 mm/s. La velocidad de prueba fue 1 mm/s, el umbral de fuerza fue de 3 N y de distancia fue 10 mm

5.7.4. Análisis de Fibra Dietaria

Los panes y coricos libres de gluten se molieron en fresco y se cuantificó la fibra dietaria total (AACC 32-05.01) utilizando un método enzimático–gravimétrico. Las muestras fueron suspendidas en buffer de fosfatos y digeridas con α -amilasa a 95-100 °C, proteasa a 60 °C y amiloglucosidasa a 60 °C. Los digeridos enzimáticos se filtraron en crisoles tarados por succión, haciendo lavados con etanol al 78% y al 95% (v/v). Los crisoles se secaron en una estufa a 100 °C por toda la noche y se dispuso un duplicado para determinación de proteína por Kjeldahl (usando un factor de conversión de 6.25) y otro duplicado para determinación de ceniza (AACC 08-01.01) en una mufla a 545 °C por 5 horas.

5.7.5. Cuantificación de Gluten en Productos de Panificación

Se cuantificó el contenido de gluten mediante un ELISA-R5 comercial (Kit Ridascreen gliadin; R-Biopharm, Darmstadt, Alemania), de tipo sándwich, según lo establece el *Codex Alimentarius* (2008). Se agregaron 100 μ L de muestra en cada pocillo de una microplaca y se incubaron durante 30 min a temperatura ambiente. Después de tres lavados, se añadieron 100 μ L de anticuerpos monoclonales que reconocen al péptido QQPFP, conjugados con peroxidasa y se incubó durante 30 min. Se realizaron tres lavados y se agregaron 50 μ L de sustrato (peróxido de urea) y 50 μ L de cromógeno (tetrametilbenzidina) a cada pozo, se incubó durante 30 min a temperatura ambiente con agitación suave. La reacción se detuvo con 100 μ L de ácido sulfúrico 1 N. Finalmente, se leyó la absorbancia a 450 nm. La concentración de gliadinas se determinó en base a una curva estándar. El resultado se multiplicó por 2 para obtener la concentración de gluten expresado en ppm.

5.7.6. Análisis Estadístico

Se analizaron los efectos y obtuvieron los valores óptimos de los factores estudiados (harina de

maíz, amaranto y camote) en las mezclas de harina. Para esto, los valores de dureza y cohesividad de las masas obtenidas de cada una de las mezclas experimentales, se utilizaron para modelar el efecto de los tres factores mencionados, a través de un modelo polinomial de segundo orden (ecuación 1), que incluyó términos lineales, cuadráticos y cruzados, de los factores. El análisis estadístico se realizó aplicando el procedimiento de superficie de respuesta en el software estadístico JMP (SAS Institute, Cary, NC, USA). Dicho método estima el análisis de varianza de la regresión por el método de mínimos cuadrados.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 (X_1) + \beta_2 (X_2) + \beta_3 (X_3) + \beta_{12} X_1 * X_2 + \beta_{13} X_1 * X_3 + \beta_{23} X_2 * X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

Y = Variable de respuesta (dureza o cohesividad)

β_0 = Intercepto.

X_1 = factor Harina de Maíz

X_2 = factor Amaranto

X_3 = factor Camote

β_1 = Coeficiente de regresión lineal para X_1

β_2 = Coeficiente de regresión lineal para X_2

β_3 = Coeficiente de regresión lineal para X_3

β_{12} = Coeficiente de regresión para la interacción $X_1 * X_2$

β_{13} = Coeficiente de regresión para la interacción $X_1 * X_3$

β_{23} = Coeficiente de regresión para la interacción $X_2 * X_3$

β_{11} = Coeficiente de regresión para X_1 con efecto cuadrático

β_{22} = Coeficiente de regresión para X_2 con efecto cuadrático

β_{33} = Coeficiente de regresión para X_3 con efecto cuadrático

La significancia de los factores y sus interacciones se consideraron a niveles de probabilidad de $p \leq 0.05$. El modelo más adecuado, se seleccionó tomando en cuenta el coeficiente de determinación o R^2 , y la adecuación del modelo determinado por la significancia de cada uno de los coeficientes de regresión en el análisis de varianza. Para representar los efectos de los parámetros estudiados, se construyeron gráficas de superficie de respuesta en 3D y perfiles predictivos del modelo

seleccionado en el mismo paquete estadístico.

Además de los procedimientos de superficie de respuesta ya descrito, se hizo estadística descriptiva y comparación de medias de los parámetros de calidad, por medio del software NCSS 2007.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Preparación y Caracterización de Harinas

Una vez obtenidas las harinas de los ingredientes a utilizar en el estudio, se caracterizaron para asegurar su calidad para la panificación. El proceso de molienda y la distribución del tamaño de las partículas resultantes, es determinante en las características de las harinas libres de gluten. La distribución del tamaño de las partículas de las harinas de maíz, amaranto reventado y camote naranja, se presentan en el Cuadro 2. En este estudio, se usaron las harinas cuyas partículas pasaron por el tamiz 60, correspondientes al 82.7, 86.3 y 90.7% de las harinas de maíz, amaranto y camote, respectivamente.

Cuadro 2. Distribución de tamaño de las partículas de las harinas de maíz, amaranto y camote.

Tamiz	Maíz	Amaranto	Camote
>40 (425 μm)	0.18	2.72	2.06
>60 (250 μm)	16.77	11.04	8.11
>80 (180 μm)	48.99	23.58	21.31
>100 (150 μm)	15.26	31.93	11.71
<100 (150 μm)	18.48	30.79	57.68

Debido a que es esencial para la panificación y la caracterización de las harinas, se determinó la capacidad de retención de agua, para obtener cuánta agua puede absorber y retener. Además, se determinó la humedad de las harinas para hacer el ajuste apropiado al 14%; así como la cantidad de proteína para determinar la cantidad de agua a añadir. Los datos de capacidad de retención de agua, humedad y proteínas, para la optimización de mezclas de maíz, amaranto y camote, se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Capacidad de retención de agua (CRA), humedad y proteína de las harinas de maíz, amaranto y camote.

	CRA	Humedad	Proteína
	(%)		
Maíz	143.84 ^a	8.74 ± 0.11 ^b	8.26 ± 0.17 ^b
Amaranto	514.28 ^b	4.39 ± 0.16 ^a	17.1 ± 0.32 ^c
Camote	91.16 ^a	4.55 ± 0.48 ^a	3.68 ± 0.08 ^a

Valores son medias ± desviación estándar. Valores dentro de la misma columna con diferentes literales en el superíndice presentan diferencias ($p < 0.05$)

Como se muestra en el cuadro 3, los ingredientes utilizados son diferentes entre sí, en cuanto a retención de agua, humedad y proteína. La capacidad de retención de agua indica la cantidad de agua necesaria para hidratar los componentes de la harina, para producir una masa con consistencia óptima (Bushuk y Békés, 2002). Dicha capacidad en la harina de trigo varía entre 60 a 62%, presentando la harina de maíz más del doble de esa capacidad, mientras que la capacidad de la harina de amaranto es al menos 8 veces mayor que la de harina de trigo (Gul y Ödes, 2020). El contenido de proteína en harina de trigo, se utiliza para calcular la cantidad óptima de agua a añadir para la formación de una masa de acuerdo al método AACC 54-40, utilizando la fórmula $y = 1.5x + 43.6$ (donde “x” es el valor de proteína en la harina y “y” la cantidad de agua a utilizar para el amasado). Sin embargo, con este cálculo se subestimó la cantidad de agua a utilizar en nuestras harinas, ya que la fórmula se desarrolló para harina de trigo. Por esto, se tomó la capacidad de retención de agua como referencia de cuánta agua agregar para elaborar las masas.

6.2. Análisis Proximal

En el cuadro 4, se muestra la composición de nutrientes de las harinas de maíz, amaranto, camote y chía. Los ingredientes usados para elaborar productos de panificación sin gluten se preseleccionaron en base a la calidad de sus componentes, para complementarse. El amaranto provee mucha más proteína que los demás ingredientes, y no solo difiere en cantidad, también en

calidad. El amaranto contiene proteína comparable a la de origen animal, por su perfil de aminoácidos y biodisponibilidad (Calderón de la Barca *et al.*, 2010). Por su parte, el camote es una rica fuente de carbohidratos complejos, que no elevan el índice glicémico y aportan dulzor a los productos (Chen *et al.*, 2019).

Cuadro 4. Composición proximal de las harinas en estudio.

Harina	Proteína	Grasa	Humedad	Cenizas
	(%)			
Maíz nixtamalizado	8.26 ± 0.17	3.82 ± 0.14	8.55 ± 0.21	1.43 ± 0.01
Amaranto reventado	17.1 ± 0.32	7.35 ± 0.17	3.62 ± 0.09	2.85 ± 0.01
Camote naranja	3.68 ± 0.08	0.26 ± 0.01	4.55 ± 0.12	3.52 ± 0.02
Chía	20.46 ± 0.13	32.03 ± 0.07	4.17 ± 0.10	3.98 ± 0.00

Los valores representan la media ± desviación estándar de tres repeticiones

El amaranto es el ingrediente que principalmente aporta proteína, lo que podemos relacionar con la aumentada capacidad de retener agua. Aunque la chía también presenta un significativo aporte de proteína, en este estudio se utilizó como aditivo, en baja proporción, ya que se busca la funcionalidad del mucílago. De igual manera la chía se destaca en su aporte de grasa, aunque es el mucílago el que se usó en el producto final y cuando se probó el grano, se añadió en baja proporción. La mezcla de estas harinas, en las proporciones óptimas que se describen más adelante, aportaría el doble de grasa de la que proporciona la harina de trigo, aunque son ácidos grasos ω -3 y ω -6; en el amaranto hay palmítico, oleico y linoleico (Burgos y Armada, 2015).

6.3. Análisis de Fenoles Totales y Capacidad Antioxidante

Además del aporte en macronutrientes por parte de los ingredientes del estudio, estos también

aportan otros elementos benéficos para la salud de los consumidores (Cuadro 5). Estos beneficios se han atribuido a los compuestos antioxidantes, incluyendo carotenoides y compuestos fenólicos, presentes en el camote y en la chíá, respectivamente. Dichos compuestos, reducen el estrés oxidativo producido por los radicales libres y, por lo tanto, protegen a las células y los tejidos del cuerpo (Donado-Pestana *et al.*, 2012). El maíz amarillo, a diferencia del blanco, aporta menos fenoles totales, pero tiene una capacidad antioxidante mayor por sus carotenoides.

Cuadro 5. Fenoles totales y capacidad antioxidante de las harinas.

Harina	Fenoles totales (mg EAG/100g)	Capacidad antioxidante	
		TEAC (mg ET/100g)	DPPH (mg ET/100g)
Maíz blanco	87.69 ± 0.10	194.86 ± 0.20	89.06 ± 0.10
Maíz amarillo	64.24 ± 0.10	221.96 ± 0.40	91.63 ± 0.00
Chía	219.43 ± 0.20	427.25 ± 0.10	229.92 ± 0.10
Amaranto	44.50 ± 0.26	119.65 ± 0.36	85.74 ± 0.07
Camote	234.97 ± 0.04	235.30 ± 0.37	188.62 ± 0.26
Los valores representan la media ± desviación estándar de tres repeticiones			

6.4. Perfil de viscosidad de las harinas

Se realizó el análisis de viscosidad de las harinas usadas en el modelo (Cuadro 6), esperando niveles intermedios de viscosidad debido a que la adición de proteína disminuye el pico de viscosidad, viscosidad final y de retroceso (Storck *et al.*, 2013). La viscosidad de ruptura o caída de viscosidad es la diferencia entre la viscosidad máxima y la viscosidad de la pasta después del cocimiento, causada por la ruptura de la estructura granular del almidón gelatinizado. Por lo tanto, el grado de ruptura es la medida entre la viscosidad de los gránulos de almidón completamente hidratados y la viscosidad de los gránulos parcial o completamente rotos. La viscosidad de retroceso es la

diferencia entre la viscosidad final y la viscosidad de la pasta después del cocimiento, y está asociada con la retrogradación del almidón (Zobel, 1984).

La harina de trigo tiene una viscosidad de ruptura de 648 cP y una viscosidad de retroceso de 1180 cP (Cordero *et al.*, 2019). Al comparar los valores con las harinas en el modelo, se observa que el amaranto tiene una viscosidad de ruptura muy alta comparada con el resto de las harinas, incluso con la harina de trigo. Esto se puede deber al tamaño de los gránulos de almidón, que miden 1.6 μm de diámetro, los cuales se hidratan rápidamente y pierden su estructura, y al procesamiento previo del grano de amaranto, ya que está reventado con aplicación de calor. Otro dato de hacer notar es la viscosidad de retroceso de las harinas de amaranto y camote, que presentan valores bajos. Este valor está relacionado con el envejecimiento del pan, por lo que se espera que el almidón retrograde menos y forme estructuras menos rígidas que alteren en menor grado las propiedades organolépticas.

Cuadro 6. Perfil de viscosidad de las harinas.

	Ruptura (cP)	Retroceso (cP)
Maíz	468.5 ^b	1592 ^b
Amaranto	1500.5 ^c	137 ^a
Camote	109.0 ^a	28 ^a

Los valores representan la media de tres repeticiones.
Valores dentro de la misma columna con diferentes literales en el superíndice presentan diferencias estadísticas ($p < 0.05$).

6.5. Optimización de Mezclas de Harinas

Para facilitar el análisis y decidir las mezclas de las harinas para la panificación, se aplicó el método de superficie de respuesta, cuya matriz se presentó en la Cuadro 1. Los datos obtenidos al analizar la dureza y cohesividad de las masas de las 19 mezclas en estudio, se muestran en la Cuadro 7. Como se puede observar, las repeticiones del punto central (mezclas 15 a 19) fueron las que presentaron valores más altos de dureza, con cohesividad de 0.3; además de las mezclas 2 y 11, todas estas mezclas presentaban la mayor cantidad de maíz añadido en la mezcla (68-77%). Las de

menor dureza, fueron las mezclas 3, 4, 7 y 9, que contienen más amaranto (25-30%). La mayor cohesividad se logró con las mezclas con más amaranto y menos maíz (mezcla 7). Los parámetros de dureza y cohesividad, se han relacionado con un mayor volumen específico final en productos de panificación (Matos y Rosell, 2015).

Los datos experimentales de dureza y cohesividad se ajustaron al modelo predictivo propuesto, pues como se observa en el Cuadro 8, para dureza el modelo explicó el 93% de la varianza total de los datos, mientras que para cohesividad fue de 86%. Respecto a la significancia y tipo de efecto de los factores, para dureza fueron significativos linealmente maíz y amaranto y los tres ingredientes, en forma cuadrática, por eso la superficie de respuesta tiene variación espacial en tres dimensiones (Figura 1). En el caso de la cohesividad, solo amaranto fue significativo, en donde la proporción de maíz no hace variar la superficie de respuesta, mientras que amaranto sí.

Cuadro 7. Parámetros de textura de las masas preparadas con las mezclas.

Mezcla	Dureza (N)	Cohesividad
1	24.85	0.266
2	27.78	0.252
3	17.55	0.313
4	17.56	0.291
5	21.87	0.263
6	23.54	0.270
7	15.99	0.337
8	18.64	0.325
9	17.37	0.306
10	23.99	0.260
11	28.47	0.226
12	20.69	0.329
13	23.65	0.269
14	22.13	0.264
15	27.42	0.303
16	29.53	0.311
17	31.91	0.309
18	27.52	0.317
19	29.54	0.277

En la Figura 1, también se muestra en el gráfico de dureza que el punto óptimo se encuentra en la intersección de los niveles 45 y 40%, de maíz y amaranto respectivamente, resultando una respuesta de 7.99 N. Con la respuesta cohesividad se muestra un efecto cuadrático muy pronunciado con el ingrediente amaranto, con un máximo alrededor de 40% de amaranto, se predice una cohesividad de 0.35.

Cuadro 8. Significancia y coeficientes de regresión de los modelos de predicción.

Variable	Dureza (N)	Cohesividad
X_1	*137.3	-0.008
X_2	*-308.7	*0.028
X_3	-76.7	0.004
X_1^2	*-335.9	-0.004
X_2^2	*-195.2	-0.006
X_3^2	*-256.1	-0.010
$X_1 * X_2$	-24.7	-0.003
$X_1 * X_3$	17.7	0.004
$X_2 * X_3$	86.1	0.005
R^2	0.93	0.860
p-valor	0.0004	0.007

X_1 : maíz, X_2 : amaranto, X_3 : camote.

*Términos significativos para la variable de respuesta.

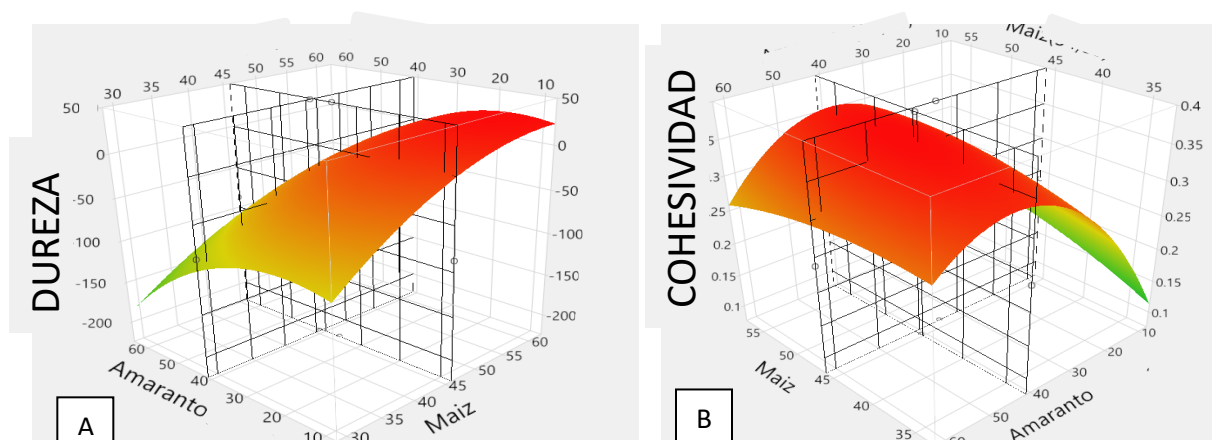


Figura 1. Perfilador de superficie de las respuestas dureza (A) y cohesividad (B) de la masa

Con el modelo de predicción se formularon 4 mezclas óptimas para panificación (Cuadro 9). La mezcla A se formuló, utilizando en el programa estadístico JMP las respuestas de dureza y cohesividad del modelo, buscando la menor dureza (17.3 N) y la mayor cohesividad (0.33) simultáneamente. La mezcla B se formuló contemplando solamente la respuesta dureza (17.3 N) sin considerar la cohesividad resultante (0.32). La mezcla C se formuló considerando solamente la respuesta de cohesividad (0.33) sin considerar la respuesta de dureza (19.55 N). La mezcla H se formuló buscando que los rangos de los ingredientes estuvieran en los límites establecidos resultando en una dureza de 7.99 N y una cohesividad de 0.35. Con estas formulaciones definidas se procedió a determinar las condiciones de panificación.

Cuadro 9. Mezclas óptimas obtenidas por el modelo de predicción.

Mezcla óptima	Ingredientes (%)			Variable respuesta	
	Maíz	Amaranto	Camote	Dureza (N)	Cohesividad
A	60.7	29.2	10.1	17.30	0.33
B	62.8	30.2	7	17.30	0.32
C	61.3	29.5	9.2	19.55	0.33
H	57	34	9	7.99	0.35

6.6. Extracción del Mucílago de Chía

Con el fin de utilizarlo como agente que facilitara la formación de una red que retuviera la producción de gas resultante de la fermentación, se extrajo mucílago de chía. de 40 g de semilla de chía se obtuvieron aproximadamente 1.6 g de mucílago, después de liofilizado y tamizado. El rendimiento se podría mejorar, ya que fue de 4%, en comparación al 7% obtenido por Muñoz *et al.* (2012), usando un método similar al aplicado en este estudio.

6.7. Condiciones de Panificación y Evaluación de los Productos

Se probaron diferentes condiciones de panificación con el fin de obtener un pan con la mejor apariencia y volumen específico. Se inició con un mezclado directo de los ingredientes por 8 min, para después moldear, fermentar 90 min y hornear 25 min. Se probaron 2 niveles de hidratación con las mezclas A, B y C (Figura 2). El análisis de capacidad de retención de agua indicó un 120% de absorción de agua para las mezclas de harinas, por lo que se probó este nivel con un 100% con relación al peso seco de la harina ajustada al 14% de humedad.



Figura 2. Corteza (I) y corte transversal (II) de los panes con las mezclas A, B y C con 100 y 120% de hidratación, así como la referencia con harina de trigo.

Con las condiciones probadas, la mezcla C mostró el mejor desempeño cuando se hidrataba con un 120% de agua, logrando $1.49 \text{ cm}^3/\text{g}$ de volumen específico, una corteza todavía pálida, con fracturas y blanda, además de una miga poco homogénea (Figura 2II). Sin embargo, la mezcla A con 120% de hidratación, alcanzó un volumen específico de solo $1.02 \text{ cm}^3/\text{g}$. De la Hera *et al.* (2013), reportaron panes de harina de maíz, elaborados con el mismo tamaño de partícula y un nivel de hidratación similar, con un volumen específico de $2.10 \text{ cm}^3/\text{g}$, esto utilizando Hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), como aditivo. Como se pretendía evitar el uso de aditivos, especialmente emulsionantes que pueden causar irritación de la mucosa intestinal, se continuó buscando condiciones de procesamiento.

Continuando con una hidratación de 120%, que dio el mejor resultado en las condiciones de procesamiento de los panes mostrados en la Figura 2, se probó la harina de maíz amarillo nixtamalizado. Los resultados se muestran en la Figura 3, para maíz blanco (I) y amarillo (II). En este ensayo, ambas mezclas C y C2 presentaron el mayor volumen específico ($1.29 \text{ cm}^3/\text{g}$). La corteza del pan elaborado con la mezcla C2 (Figura 3II), resultó blanda y menos fracturada, además de que la miga era más suave y alveolada que la mezcla C. De la Hera *et al.* (2010) reportaron un volumen específico de $2.93 \text{ cm}^3/\text{g}$ en panes de maíz amarillo, incluyendo aditivo HPMC.

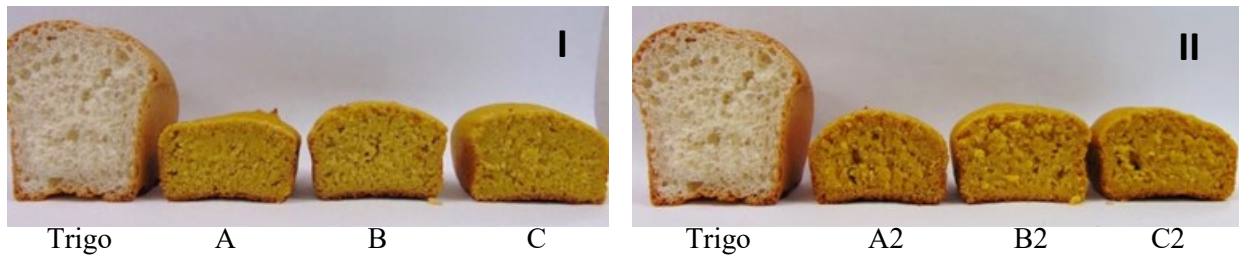


Figura 3. Corte transversal de los panes con las mezclas de harina de maíz blanco (A, B y C) o harina de maíz amarillo (A2, B2, C2), con 120% hidratación.

Debido a que el pan elaborado con harina de maíz amarillo presentó una mejor apariencia, se continuó trabajando con esta harina y se incluyó chía entera después de hidratarla, a manera de aditivo, por su alto contenido de mucílago. Los resultados, se muestran en la Figura 4. Aunque el volumen específico no mejoró, solo pasó de 1.30 a 1.34 cm^3/g en la mezcla con maíz blanco y de 1.29 a 1.32 cm^3/g en la mezcla con maíz amarillo, si hubo efectos en apariencia. Con la adición de chía, disminuyeron las fracturas en la corteza y mejoró la miga, aunque en la mezcla con la harina de maíz blanco, presentó poca homogeneidad. Steffolani *et al.* (2014) usó semilla de chía hidratada en panes sin gluten, obteniendo excelentes resultados, pero con adición de HPMC.

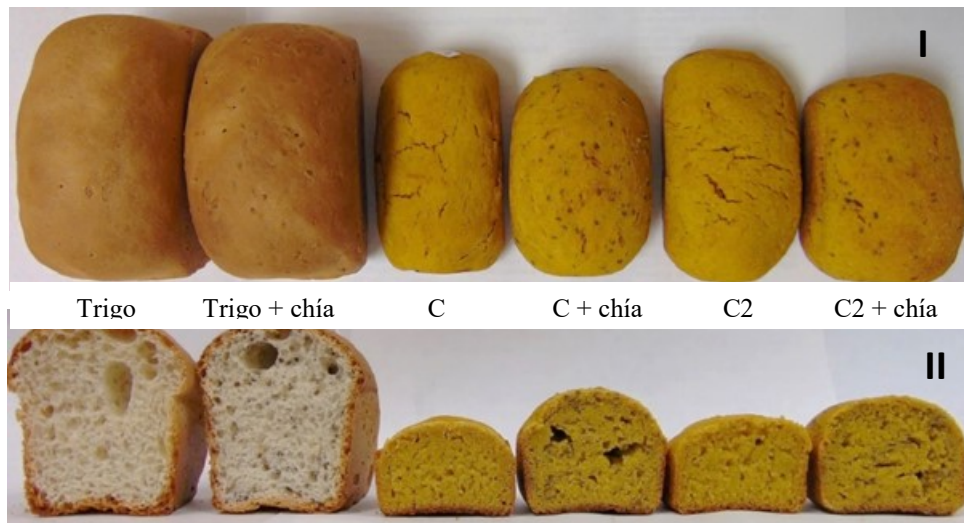


Figura 4. Corteza (I) y corte transversal (II) de los panes con las mezclas C y C2, sin y con chía pre-hidratada.

Se continuó experimentando panificación con la semilla de chía hidratada, con la mezcla H (con alto contenido de amaranto) y harina de maíz amarillo (H2), que dio mejores resultados en el ensayo anterior. Se probaron diferentes niveles de hidratación, ya que la miga en todos los ensayos previos mantenía un aspecto húmedo. La adición de 95% de agua a la mezcla H resultó en el mayor volumen específico, 1.80 cm³/g, una corteza crujiente, dorada y uniforme (Figura 5I-H2 95%) y una miga todavía poco uniforme, aunque con aspecto menos húmedo (Figura 5II-H2 95%). En un estudio hecho por Różyło *et al.* (2015), probaron diferentes niveles de hidratación en panes de harina de maíz sin nixtamalizar, mostrando que hidrataciones superiores al 80% del peso seco, mejoraban las cualidades de los panes.

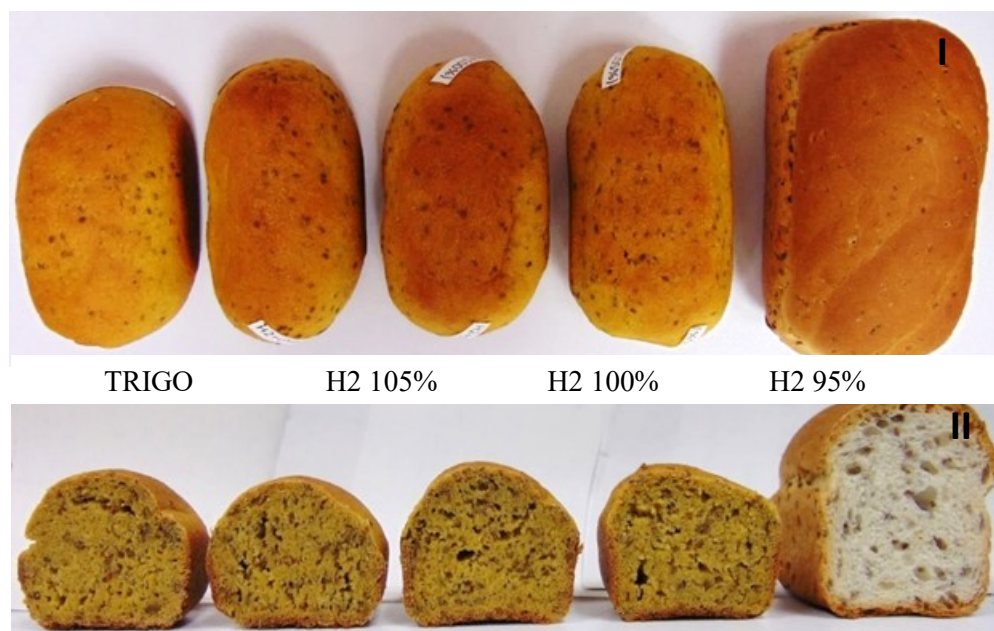


Figura 5. Corteza (I) y corte transversal (II) de panes con la mezcla H (alta en amaranto), con maíz amarillo, chía pre-hidratada, a diferentes niveles de hidratación (105-90%).

En los ensayos previos, se percibió que la semilla de chía, aunque ayudó a mejorar características, daba al pan apariencia que podría resultar negativa para algunos consumidores. Por esto, no se aumentó la cantidad de semilla añadida y se consideró usar solo el mucílago, buscando mejorar el volumen específico. Al añadir el mucílago a la masa la hizo más manejable. Además, con la adición de 1.2% de mucílago, se produjo un pan con volumen específico de 1.67 cm³/g, con una corteza

crujiente, dorada y uniforme (Figura 6I) y una miga homogénea, alveolada y con menos humedad (Figura 6II).

Fernandes y Salas-Mellado (2017) encontraron 2.34% de aumento del volumen de pan de trigo adicionando 1.5% de mucílago de chía. En nuestro comparativo de pan de trigo (imagen no mostrada), al añadir 1.2% de mucílago, el volumen específico del pan aumentó en un 8%. Esto significa que fue más eficiente nuestro proceso que el de dichos autores.

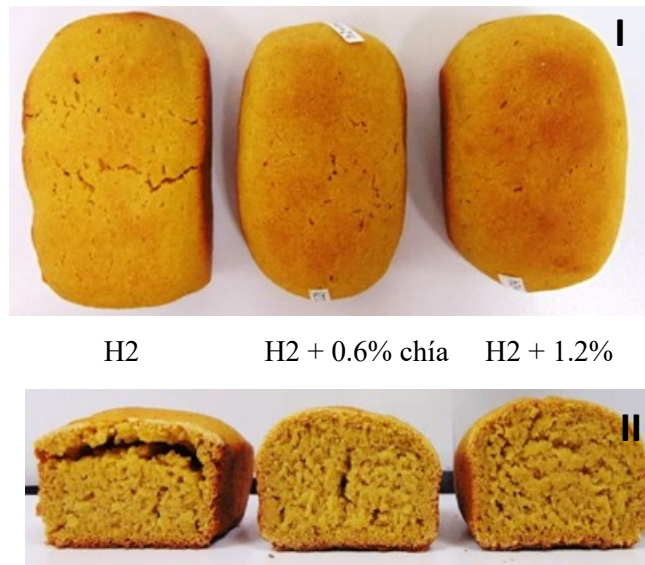


Figura 6. Corteza (I) y corte transversal (II) de los panes con mezcla H2, con 0.6 y 1.2% de mucílago de chía.

Además de pan de caja, se elaboró un producto regional tipo galleta, llamado corico, en el cual se sustituyó el total de la harina de maíz con la mezcla H2. La harina H2 se comportó de una manera muy similar a la harina de maíz. El amaranto presente en la mezcla ayudó a que la masa fuera más elástica pero que a su vez absorbiera más agua. De igual manera al salir del horno tenían un color dorado más oscuro que la contraparte con solo maíz (Figura 7II).



Figura 7. Apariencia de coricos de maíz (I) y coricos de la mezcla H2 (II).

6.7.1. Análisis Proximal

En el Cuadro 10 se muestra el análisis proximal de los panes y los coricos. El aporte de proteína en base seca fue 1.76% menor en el pan H2, que en el de trigo, pero un mayor aporte de aminoácidos esenciales, en especial Leu y Lys (Cuadro 11). En cuanto a los coricos, los preparados con la mezcla H2 contenían 1.5% más proteína en base seca, que los convencionales de solo maíz amarillo; esto además de la mejor calidad proteica debido al aporte de amaranto (Bodroza-Solarov *et al.*, 2007). Mientras que el pan se puede considerar bajo en grasa tanto el H2 como el de trigo solo, los coricos presentaron un porcentaje elevado de grasa. Sería conveniente, buscar alternativas con menos grasa, quizá incluyendo el mucílago de chía.

Cuadro 10. Composición proximal de los panes y coricos.

Muestra	Humedad	Proteína	Grasa	Ceniza	Carbohidratos ¹
	(%)				
Pan trigo + 1.2% mucílago	22.08 ± 0.29 ^c	9.55 ± 0.28 ^c	1.71 ± 0.27 ^a	1.60 ± 0.02 ^a	65.06
Pan H2 + 1.2% mucílago	39.64 ± 0.23 ^d	6.55 ± 0.03 ^b	1.37 ± 0.15 ^a	1.75 ± 0.01 ^a	50.69
Corico maíz amarillo	3.17 ± 0.06 ^a	5.34 ± 0.02 ^a	23.93 ± 0.05 ^c	1.98 ± 0.07 ^b	65.58
Corico H2	5.77 ± 0.05 ^b	6.63 ± 0.01 ^b	22.24 ± 0.29 ^b	2.20 ± 0.01 ^c	63.16

Los valores representan la media ± desviación estándar de tres repeticiones. ¹ Calculados por diferencia. Valores dentro de la misma columna con diferentes literales en el superíndice presentan diferencias estadísticas ($p < 0.05$).

Cuadro 11. Perfil de aminoácidos de los panes de trigo y de mezcla H2 (g aminoácido/100 g proteína)

Aminoácido	Pan trigo	Pan H2
Isoleucina	3.49	3.86
Leucina	7.14	9.74
Lisina	3.07	3.82
Metionina	1.61	1.95
Fenilalanina	4.83	4.59
Treonina	3.13	3.78
Triptófano	1.39	1.15
Valina	4.73	4.90
Arginina	4.93	5.80
Histidina	2.45	2.60
Alanina	3.87	6.09
Ácido aspártico	5.28	8.10
Ácido glutámico	31.97	17.74
Glicina	4.20	5.93
Prolina	10.64	6.87
Serina	4.92	6.04
Cisteína	2.72	1.37
Tirosina	3.20	3.74
Datos de las harinas tomados de FAO (1970) y ponderados por su proporción en los productos.		

6.7.2. Análisis de Textura

Los resultados del análisis de textura del pan de trigo con mucílago son comparables a los del trabajo de Fernandes y Salas-Mellado (2017), con aumento en la firmeza al sustituir la grasa con mucílago de chía. Aunque la máxima adición de mucílago de chía fue de 0.11%, la firmeza se incrementó 3.15 N con respecto al pan control, alcanzando un valor de 6.2 N. En nuestro estudio, se añadió 1.2% de mucílago, y se obtuvo una firmeza de 10.5 N (Cuadro 12).

Respecto al pan con harina H2, De la Hera *et al.* (2013) elaboraron panes de maíz amarillo y HPMC que resultaron con una firmeza de 18.54 N, elasticidad de 0.783, cohesividad de 0.209 y resiliencia de 0.072. Al compararlos con nuestro pan elaborado con la harina H2, fueron mayores la firmeza, cohesividad y resiliencia, mientras que hubo menor elasticidad en los panes de De la Hera. Sin embargo, el parámetro que más percibe el consumidor es la masticabilidad, que fue estadísticamente igual ($p>0.05$) entre el pan de trigo y el pan H2.

Cuadro 12. Propiedades de textura del pan de trigo y del pan con harinas de maíz, amaranto y camote.

Muestra	Pan trigo + 1.2% mucílago	Pan H2 + 1.2% mucílago
Firmeza (N)	10.47 ± 2.63^a	20.80 ± 4.69^b
Elasticidad	0.92 ± 0.015^b	0.63 ± 0.19^a
Cohesividad	0.51 ± 0.05^b	0.36 ± 0.06^a
Gomosidad	5.27 ± 0.86^a	7.33 ± 1.07^b
Masticabilidad (N)	4.86 ± 0.75^a	4.70 ± 2.02^a
Resiliencia	0.33 ± 0.09^b	0.14 ± 0.02^a

Valores son medias $\pm$ desviación estándar. Valores dentro de la misma línea con diferentes literales en el superíndice presentan diferencias ($p<0.05$).

La medición de dureza de los coricos (Cuadro 13) elaborados con harina de maíz amarillo se asemeja a las galletas elaboradas por Belorio *et al.* (2019) las cuales mostraron una dureza de 34.10 N. Los coricos hechos con la harina H2 mostraron una dureza mucho mayor, comparándose con las galletas de amaranto con dureza de 66.84 N (Calderón de la Barca *et al.*, 2010).

Cuadro 13. Dureza de los coricos de harina de maíz amarillo y de harina H2.

Muestra	Dureza (N)
Corico maíz amarillo	24.17 ± 2.1^a
Corico H2	67.46 ± 17.9^b

Valores son medias $\pm$ desviación estándar. Valores dentro de la misma columna con diferentes literales en el superíndice presentan diferencias estadísticas ($p<0.05$).

6.7.3. Análisis de Fibra

La fibra dietaria total se muestra en la Cuadro 14. No hubo diferencia significativa ($p>0.05$) en fibra dietaria total entre el pan de solo trigo y el elaborado con la mezcla de harinas H2. El pan de trigo con mucílago de chía se puede comparar con las formulaciones que se han hecho con harina de semilla de chía. Švec y Hrušková (2015), obtuvieron un contenido de fibra dietaria similar al estimado en el pan de trigo con semillas de chía hidratadas (3.89%). Para el pan H2 el aumento en fibra dietaria se puede deber a la adición de harina de amaranto la cual aporta 13.43% de fibra dietaria por cada 100 g (Bodroža-Solarov *et al.*, 2008). Finalmente, la cantidad de fibra dietaria estimada en los coricos concuerda con la cantidad de fibra dietaria reportada en estudios de harina de maíz (Flores-Farias *et al.*, 2002)

Cuadro 14. Contenido de fibra dietaria en los panes y coricos comparando los convencionales con los de harinas H2.

Muestra	Fibra (%)
Pan trigo + 1.2% mucílago	3.99 ± 0.15^b
Pan H2 + 1.2% mucílago	5.98 ± 0.08^c
Corico maíz amarillo	1.22 ± 0.03^a
Corico H2	3.06 ± 0.45^b
Valores son medias $\pm$ desviación estándar. Valores dentro de la misma columna con diferentes literales en el superíndice presentan diferencias estadísticas ($p<0.05$)	

6.7.4. Cuantificación de Gluten en Productos de Panificación

En el Cuadro 15 se presentan los resultados del contenido de gluten en los productos elaborados con la mezcla de harinas H2 y en sus controles. Los panes y los coricos elaborados con la mezcla de harinas H2 mostraron contenido de gluten menor a 20 ppm. De Acuerdo al *Codex Alimentarius* (2008), los alimentos con niveles no mayores a 20 ppm pueden ser denominados libres de gluten.

Cuadro 15. Contenido de gluten en los panes de trigo y con harina H2 y en los coricos de harina de maíz y H2.

Muestra	Gluten (ppm)
Pan trigo + 1.2% mucílago	104,750.0
Pan H2 + 1.2% mucílago	11.5
Corico Maíz Amarillo	5.0
Corico H2	6.5

7. CONCLUSIONES

El procesamiento de las harinas de amaranto reventado y camote naranja se logró exitosamente y junto con las harinas de maíz nixtamalizado blanco y amarillo, constituyen ingredientes con buen aporte de nutrimentos, en especial fibra dietaria, proteína y antioxidantes. Así mismo presentaron características fisicoquímicas que se pueden complementar para panificación.

El método de superficie de respuesta fue muy útil para llegar a la mezcla óptima de harinas para la panificación, utilizando las de maíz amarillo, amaranto y camote, en proporciones de 57%, 34% y 9%, respectivamente (mezcla H2).

Con la mezcla H2, se obtuvo el pan con mejores características por el proceso de masa directa, con 95% de agua y 1.2% de mucílago de chía, 52 min de fermentación y horneado de 25 min a 210 °C. El producto, presentó corteza uniforme, crujiente y dorada, así como miga homogénea, con un volumen específico de 41% del de pan de trigo y 60% de su tamaño. Al sustituir parcialmente la harina de maíz en la receta de coricos, con harinas de amaranto y camote, el producto final tenía un color dorado más pronunciado que cuando se preparó de solo harina de maíz.

El pan H2 presentó buena calidad proteica, con mejor perfil de aminoácidos indispensables que el pan de trigo; por su parte, en los coricos no fue solo la calidad proteica sino también mayor la concentración que en su contraparte convencional de solo harina de maíz. Los productos de panificación elaborados con la harina H2, presentaron 2% más de fibra dietaria que los convencionales y son libres de gluten, ya que su concentración es menor a 20 ppm, como indica la norma. Así, además de seguros, los prototipos desarrollados son una alternativa nutritiva para personas a las que afecta la ingestión de trigo.

8. REFERENCIAS

- AACC International. 2000. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 10th ed. AACC, St. Paul, MN.
- Abadie V., Sollid L.M., Barreiro L.B. y Jabri B. 2011. Integration of genetic and immunological insights into a model of celiac disease pathogenesis. *Annu Rev Immunol.* 29:493–525.
- Acs E., Kovacs Z.S. y Matuz J. 1996a. Bread from cornstarch for dietetic purposes. I. Structure formation. *Cereal Res Commun.* 24:41–49
- Acs E., Kovacs Z.S. y Matuz J. 1996b. Bread from cornstarch for dietetic purposes. II. Formation of the visual and technological properties. *Cereal Res Commun.* 24:51–59
- Aina A.J., Falade K.O., Akingbala J.O. y Titus P. 2009. Physicochemical properties of twenty-one Caribbean sweet potato cultivars. *Int J Food Sci Technol.* 44:1696–1704
- Álvarez-Jubete L., Arendt E.K. y Gallagher E. 2010. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends Food Sci Tech.* 21:106–113
- Andersson H., Ohgren C., Johansson D., Kniola M. y Stading M. 2011. Extensional flow, viscoelasticity and baking performance of gluten-free zein-starch doughs supplemented with hydrocolloids. *Food Hydrocoll.* 25:87–95
- Anton A.A. y Artfield S.D. 2008. Hydrocolloids in gluten-free breads: a review. *Int J Food Sci Nutr.* 59:11–23
- Apea-Bah F.B., Oduro I., Ellis W.O. y Safo-Kantanka O. 2011. Factor Analysis and Age at Harvest Effect on the Quality of Flour from Four Cassava Varieties. *World J Dairy Food Sci.* 6:43-54
- Arendt E.K., Morrissey A., Moore M.M. and Dal-Bello F. 2008. *Gluten-Free Breads*. London: Academic Press.
- Arranz-Otaegui A., González-Carretero L., Ramsey M.N., Fuller D.Q. y Richter T. 2018. Archaeobotanical evidence reveals the origins of bread 14,400 years ago in northeastern Jordan. *Proc Natl Acad Sci U S A.* www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1801071115
- Aufhammer W. 2000. *Pseudogetreidearten: Buchweizen, Reismelde und Amarant*. Stuttgart, Germany: Verlag Ulmer
- Awuini V., Alhassan M. W., Amagloh F. K. 2017. Orange- fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas*) composite bread as a significant source of dietary vitamin A. *Food Sci Nutr.* 6:174–179
- Ayerza R., Coates W. 2005. *Chia: Rediscovering a Forgotten Crop of the Aztecs*. The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA.
- Baker L.A. y Rayas-Duarte P. 1998. Freeze-thaw stability of amaranth starch and the effects of salt and sugars. *Cereal Chem.* 75:1–7
- Belorio M., Sahagún M y Gómez M. 2019. Influence of Flour Particle Size Distribution on the Quality of Maize Gluten-Free Cookies. *Foods.* 8:83

- Bloksma A.W. 1990. Dough structure, dough rheology, and baking quality. *CFW*. 35:37–43
- Bode S. y Gudmand-Høyer E. 1998. Incidence and clinical significance of lactose malabsorption in adult coeliac disease. *Scand. J. Gastroenterol.* 23:84–88
- Bodroža-Solarov M., Filipčev B., Kevrešan Ž., Mandić A. y Šimurina O. 2008. Quality of bread supplemented with popped *Amaranthus cruentus* grain. *Journal of Food Process Engineering*. 31:602–618
- Brand-Williams W., Cuvelier M., y Berset C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*. 28:25-30.
- Bodroza-Solarov M., Filipcev B., Kevresan Z., Mandic A. y Simurina O. 2007. Quality of bread supplemented with popped *Amaranthus cruentus* grain. *J Food Process Eng.* 31:602–618
- Burgos V.E. y Armada M. 2015. Characterization and nutritional value of precooked products of kiwicha grains (*Amaranthus caudatus*). *Food Sci. Technol.* 35(3): 531-538
- Bushuk W. y Békés F. 2002. Contribution of protein to flour quality. En: Salgó A., Tömösközi S. y Lásztity R.(eds.). *Proc. Novel Raw Materials, Technologies and Products – New Challenge for the Quality Control*. ICC, Viena, Austria, pp. 4–9.
- Cabrera-Chávez F., Rozaud-Sánchez O., Sotelo-Cruz N. y Calderón-de-la-Barca A.M. 2009. Bovine milk caseins and transglutaminase-treated cereal prolamins are differentially recognized by IgA of celiac disease patients according to their age. *J Agric Food Chem.* 57:3754-3759
- Calderón de la Barca A.M., Rojas-Martínez M.E., Islas-Rubio A.R. y Cabrera-Chávez F. 2010. Gluten-free breads and cookies of raw and popped amaranth flours with attractive technological and nutritional qualities. *Plant Foods Hum Nutr.* 65:241-246
- Catassi C., Bai J.C., Bonaz B. 2013. Non-celiac gluten sensitivity: The new frontier of gluten related disorders. *Nutrients*. 5:39-53.
- Catassi C., Elli L., Bonaz B. 2015. Diagnosis of non-celiac gluten sensitivity (NCGS): The Salerno experts' criteria. *Nutrients*. 7:66-77.
- Cauvain S.P. 1998. Other cereals in bread making. In: Cauvain SP, Young LS (Eds) *Technology of bread making*. Blackie Academic & Professional, London, 330–346 pp.
- Chen C.M., Shih C.K., Su Y.J., Cheang K.U., Lo S.F. y Li S.C. 2019. Evaluation of white sweet potato tube-feeding formula in elderly diabetic patients: a randomized controlled trial. *Nutrition & Metabolism*. 16:70
- Christianson D.D., Gardner H.W., Warner K., Boundy B.K. y Inglett G.E. 1974. Xanthan gum in protein-fortified starch bread. *Food Technol.* 28:23–26, 28–29
- Codex Alimentarius. 2008. Draft revised standard for gluten-free foods. <http://www.codexalimentarius.net>.
- Coelho M. S. y Salas-Mellado M. M. 2015. Effects of substituting chia (*Salvia hispanica* L.) flour or seeds for wheat flour on the quality of the bread. *Food Science and Technology*. 60:729-736
- Cordero-Fernández D.L., Granados-Nevárez M. del C., Islas-Rubio A.R., Verdú-Amat S., Ramírez-Wong B. y Vásquez-Lara F. 2020. Utilización de fibra de avena con diferente tamaño de partícula en panificación: efecto reológico y textural. *Revista Mexicana de*

- De Giorgio R., Volta U. y Gibson P.R. 2016. Sensitivity to wheat, gluten and FODMAPs in IBS: ¿facts or fiction?. *Gut*. 65:169–178. DOI: 10.1136/gutjnl-2015-309757
- De la Hera E., Talegón M., Caballero P., Gómez M. 2013. Influence of maize flour particle size on gluten-free breadmaking. *J Sci Food Agric*. 93:924–932.
- Di-Cagno R., Rizzello C.G., De Angelis M., Cassone A., Giuliani G.M., Benedusi A., Limitone A., Surico R. y Gobbetti M. 2008. Use of selected sourdough strains of *Lactobacillus* for enhancing the nutritional and sensory properties of gluten-free breads. *J Food Prot*. 71:1491–1495
- Dickinson E. 2003. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocoll*. 17:25–39
- Donado-Pestana C.M., Salgado J.M., Ríos A. de O., Robertina dos Santos P., Jablonski A. 2012. Stability of Carotenoids, Total Phenolics and In Vitro Antioxidant Capacity in the Thermal Processing of Orange Fleshed Sweet Potato (*Ipomoea batatas* Lam.) Cultivars Grown in Brazil. *Plant Foods Hum Nutr*. 67:262–270
- Eliasson A.C. y Larsson K. 1993. *Cereals in Breadmaking: A Molecular Colloidal Approach*. New York: CRC Press
- Faas P. 1994. Bread raised with yeast became a staple in the Roman Republic. *Around the Roman Table: Food and Feasting in Ancient Rome*. Chicago: University of Chicago Press, 1994
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1970. Contenido en aminoácidos de los alimentos y datos biológicos sobre las proteínas. Roma, Italia.
- Fernandes S.S. y Myriam de las Mercedes Salas-Mellado. 2017. Addition of chia seed mucilage for reduction of fat content in bread and cakes. *Food Chemistry*. 227:237–244.
- Finney K.F. y Barmore M.A. 1948. Loaf volume and protein content of hard winter and spring wheats. *Cereal Chemistry*. 25:291-312
- Flores-Farías R., Martínez-Bustos F., Salinas-Moreno Y. y Ríos E. 2002. Caracterización de harinas comerciales de maíz nixtamalizado. *Agrociencia*. 36(5): 557-567
- Gallagher E. 2009. *Gluten-free Food Science and Technology*. 1ra. ed. Londres: Wiley-Blackwell.
- Gallagher E., Gormley T.R. y Arendt E.K. 2003. Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *J. Food Eng*. 56:53–61
- Gallagher E., Gormley T.R. y Arendt E.K. 2004. Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends Food Sci. Technol*. 15:43–52
- Gambus H., Gambus F. y Sabat R. 2002. The research on quality improvement of gluten-free bread by amaranthus flour addition. *Zywnosc*. 9:99–112
- Gómez M.H., Rooney L.W., Waniska R.D. y Pflugfelder R.L. 1987. Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World*. 32:372-377.
- Gujral H.S. y Rosell C.M. 2004. Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Res Int*. 37:75–81
- Gul H. y Ödeş N. 2020. The effects of grape seed flour and glucose oxidase supplementation on

- the some quality attributes of bread. *Int. J. Agric. For. Life Sci.* 4(1):14-20.
- Gwirtz J.A. y García-Casal M.N. 2014. Processing maize flour and corn meal food products. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1312:66–75.
- Hoefler A.C. 2004. *Hydrocolloids: Practical Guides for the Food Industry* (Eagan Press Handbook Series). St. Paul, MN: AACC
- Houben A., Gotz H., Mitzscherling M. y Becker T. 2010. Modification of the rheological behavior of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) dough. *J Cereal Sci.* 51:50–56
- Hunjai C., Wansoo K. y Malshick S. 2004. Properties of Korean amaranth starch compared to waxy millet and waxy sorghum starches. *Starch-Stärke.* 56:69–77
- Hurrell R.F. 2003. Influence of vegetable protein sources on trace element and mineral bioavailability. *J Nutr.* 133:2973S–2977S
- Huttner E.K. y Arendt E.K. 2010. Recent advances in gluten-free baking and the current status of oats. *Trends Food Sci. Technol.* 21:03–12
- Ibanoglu E. y Ercelebi E.A. 2007. Thermal denaturation and functional properties of egg proteins in the presence of hydrocolloid gums. *Food Chem.* 101:26–33
- Igbabul B., Num G. y Amove J. 2014. Quality Evaluation of Composite Bread Produced from Wheat, Maize and Orange Fleshed Sweet Potato Flours. *Am J Food Technol.* 2:109-115. doi: 10.12691/ajfst-2-4-1.
- Iglesias-Puig E. y Haros M. 2013. Evaluation of performance of dough and bread incorporating chia (*Salvia hispanica* L.). *Eur. Food Res. Technol.* 237:865-874.
- Ixtaina V.Y., Nolasco S.M., Tomas M.C. 2008. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Ind. Crop Prod.* 28:286-293.
- Jonagh G., Slim T. y Greve H. 2968. Bread without gluten. *Bak Dig.* 6:24–29
- Julianti E., Rusmarilin H., Ridwansyah y Yusraini E. 2017. Functional and rheological properties of composite flour from sweet potato, maize, soybean and xanthan gum. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences.* 16:171–177
- Kidane G., Abegaz K., Mulugeta A. y Singh P. 2013. Nutritional Analysis of Vitamin A Enriched Bread from Orange Flesh Sweet Potato and Locally Available Wheat Flours at Samre Woreda, Northern Ethiopia. *Curr Res Nutr Food Sci. Jour.* 1:49-57
- Koca N., Burdurlu H. S. y Karadeniz F. 2005. Kinetics of colour changes in dehydrated carrots. *J. Food Eng.* 449–455
- Koua G.A.Y., Zoué T.L., Mégnanou R.M. y Niamké S.L. 2018. Nutritive Profile and Provitamin A Value of Sweet Potatoes Flours (*Ipomoea batatas* Lam) Consumed in Côte d'Ivoire. *Journal of Food Research.* 7
- Lawton J.W. 1992. Viscoelasticity of zein-starch doughs. *Cereal Chem.* 69:51–55
- Lazaridou A., Duta D., Papageorgiou M., Belc N. y Biliaderis C.G. 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *J Food Eng.* 79:33–47
- Lee M. y Lee Y. 2006. Properties of gluten-free rice breads using different rice flours prepared by

dry, wet and semi-wet milling. Food Eng Prog. 10:80–85

- Lin K.Y., Daniel J.R. y Whistler R.L. 1994. Structure of chia seed polysaccharide exudate. Carbohydr Polym. 23(1): 13-18.
- Lindfors K., Ciacci C., Kurppa K., Lundin K.E.A., Makharia G.K., Mearin L.M., Murray J.A., Verdu E.F. y Kaukinen K. 2019. Coeliac disease. Nat Rev Dis Primers. 5:3.
- Lohiniemi S., Maki M., Kaukinen K., Laippala P. y Collin P. 2000. Gastrointestinal symptoms rating scale in coeliac disease patients on wheat starch-based gluten-free diets. Scand. J. Gastroenterol. 35:47–49
- Lohman S. 2019. A brief story of bread. History. Publicado: 18 diciembre 2012, consultado 11 abril 2019. Disponible en: <https://www.history.com/news/a-brief-history-of-bread>.
- Ludvigsson J.F., Leffler D.A., Bai J.C., *et al.* 2013. The Oslo definitions for coeliac disease and related terms. Gut. 62:43-52.
- Luna-Alcocer V. 2018. Composición Nutricia, costo y aditivos en productos industrializados libres de gluten y su apego a la norma oficial mexicana (Tesis de maestría). Irapuato, Guanajuato. Dra. María Esther Mejía León. 74 pp.
- Machado-Alencar N.M., Steel C.J., Dutra-Alvim I., Carvalho de Moraes E. y Andre-Bolini H.M. 2015. Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: temporal profile and instrumental analysis. LWT - Food Science and Technology. doi: 10.1016/j.lwt.2015.02.029.
- Matos M.E. y Rosell C.M. 2015. Understanding gluten-free dough for reaching breads with physical quality and nutritional balance. J Sci Food Agric. 95:653–661.
- McCarthy D.F., Gallagher E., Gormley T.R., Schober T.J. y Arendt E.K. 2005. Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. Cereal Chem. 82:09–15
- Meilgaard M., Civille V. y Carr B.T. 2007. Sensory evaluation techniques. 4ta ed. Boca Raton: CRC Press. 464 pp.
- Miyazaki M.R., Hung P.V., Maeda T. y Morita N. 2006. Recent advances in application of modified starches for breadmaking. Trends Food Sci Technol. 17:91–99
- Moore M.M., Heinbockel M., Dockery P., Ulmer H.M. y Arendt E.K. 2006. Network formation in gluten-free bread with application of transglutaminase. Cereal Chem. 83:28–36.
- Moreira R., Chenlo F. y Torres M.D. 2013. Effect of chia (*Sativa hispanica* L.) and hydrocolloids on the rheology of gluten-free doughs based on chestnut flour. LWT Food Sci. Technol. 50:160-166.
- Muñoz L. A., Cobos A., Díaz O. y Aguilera J.M. 2012. Chia seeds: microstructure, mucilage extraction and hydration. Journal of Food Engineering. 108:216-224
- Muñoz L. A., Cobos A., Díaz O. y Aguilera J.M. 2013. Chia seed (*Salvia hispanica*): an ancient grain and new functional food. Food Rev. Int. 29:394–408.
- Ndawula J., Kabasa J.D. y Byaruhanga Y.B. 2004. Alterations in fruit and vegetable β -carotene and vitamin C content caused by open-sun drying, vesqueen-covered and polyethylene-covered solar dryers. Africa Health Sci. 125–130

- Nielsen J. 2019. Yeast Systems Biology: Model organism and Cell Factory. *Biotechnol J.* Mar 29:e1800421. doi: 10.1002/biot.201800421. [Epub ahead of print]
- Oberhuber G, Granditsch G y Vogelsang H. 1999. The histopathology of coeliac disease: Time for a standardized report scheme for pathologists. *Eur J Gastroenterol Hepatol.* 11:85-94.
- Ou B., Hampsch-Woodill M., y Prior R.L. 2001. Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. *J Agric Food Chem.* 49:4619-4626.
- Pflugfelder R.L., Rooney L.W., y Waniska R.D. 1988. Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chem.* 65:262-266.
- Re R., Pellegrini N., Proteggente A., Pannala A., Yang M., y Rice-Evans C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic Biol Med.* 26:1231-1237
- Reig-Otero Y., Mañes J. y Manyes-I-Font L. 2017. Sensibilidad al gluten no celiaca (SGNC): manejo nutricional de la enfermedad. *Nutr Clín Diet Hosp.* 37:171-182
- Remes-Troche J.M., Uscanga-Domínguez L.F., Aceves-Tavares R.G., Calderón-de-la-Barca A.M., Carmona-Sánchez RI, Cerda-Contreras E, *et al.* 2018. Guía clínica para diagnóstico y tratamiento de la enfermedad celiaca en México. *Rev Gastroenterol Mex.* 83:434-450.
- Ribotta P.D., Ausar S.F., Morcillo M.H., Pérez G.T., Beltramo D.M. y León A.E. 2004. Production of gluten-free bread using soybean flour. *J. Sci. Food Agric.* 84:69–74
- Rostami K., Bold J., Parr A. y Johnson M.W. 2017. Gluten-Free Diet Indications, Safety, Quality, Labels, and Challenges. *Nutrients.* 9:846
- Różyło R., Dziki D., Gawlik-Dziki U., Cacak-Pietrzak G., Miś A. y Rudy S. 2015. Physical properties of gluten-free bread caused by water addition. *Int. Agrophys.* 29:353-364
- Sabbione A.C., Suarez S., Añon M.C. y Scilingo A. 2018. Amaranth functional cookies exert potential antithrombotic and antihypertensive activities. *J Food Sci Technol.* doi:10.1111/ijfs.13930
- Sánchez H.D., Osella C.A. y De la Torre M.A. 2002. Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour and cassava starch. *J Food Sci.* 67:16–19
- Sánchez H.D., Osella C.A. y De la Torre M.A. 2004. Use of response surface methodology to optimize gluten-free bread fortified with soy flour and dry milk. *Food Sci Technol. Int.* 10:5–9
- Schober T.J., Bean S.R., Boyle D.L. y Park S.H. 2008. Improved viscoelastic zein-starch doughs for leavened gluten-free breads: their rheology and microstructure. *J Cereal Sci.* 48:55–67
- Schober T.J., Moreau R.A., Bean S.R. y Boyle D.L. 2010. Removal of surface lipids improves the functionality of commercial zein in viscoelastic zein-starch dough for gluten-free breadmaking. *J. Cereal Sci.* 52:17–25
- Sciarini L.S., Steffolani M.E. y León A.E. 2016. El rol del gluten en la panificación y el desafío de prescindir de su aporte en la elaboración de pan. *Agriscientia.* 33:61-74
- Seoane-Viqueira R.M. 1997. Evolución del sector panadero: Técnicas actuales de panificación. *Cienc Tecnol Aliment.* 1:149-152.

- Singleton V.L. y Rossi J.A. 1965. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *Am J Enol Vitic.* 16:144-158
- Steffolani E., De la Hera E., Pérez G. y Gómez M. 2014. Effect of chia (*Salvia hispanica* L.) addition on the quality of gluten-free bread. *Journal of Food Quality.* 37:309–317
- Storck C.R., Zavareze E., Arocha M., Elias C.M., Rosell C.M. y Guerra A.R. 2013. Protein enrichment and its effects on gluten-free bread characteristics. *LWT – Food Sci Technol.* 53:346–354.
- Švec I. y Hrušková M. 2015. Hydrated chia seed effect on wheat flour and bread technological quality. *Agric Eng Int: CIGR Journal, Special issue 2015: 18th World Congress of CIGR.* 259-263.
- Tadesse T.F., Nigusse G. y Kurabachew H. 2015. Nutritional, Microbial and Sensory Properties of Flatbread (kitta) Prepared from Blends of Maize (*Zea mays* L.) and Orange-fleshed Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Flours. *Int J Food Eng.* 5:33-39
- Tortora R., Capone P., De-Stefano G., Imperatore N., Gerbino N., Donetto S., Monaco V., Capooraso N. y Rispo A. 2015. Metabolic syndrome in patients with coeliac disease on a gluten-free diet. *Aliment Pharmacol Ther.* 41:352–359.
- Toufeili I., Dagher S., Shadarevian S., Nouredine A., Sarakbi M. y Farran M.T. 1994. Formulation of gluten free pocket-type flat breads: optimization of methylcellulose, gum arabic, and egg albumin levels by response-surface methodology. *Cereal Chem.* 71:594–601
- Van-Hal M. 2000. Quality of sweet potato flour during processing and storage. *Food Reviews International.* 16:1-37
- Vázquez-Ovando A., Rosado-Rubio G., Chel-Guerrero L., Betancur-Ancona D. 2009. Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia (*Salvia hispanica* L.). *Food Science and Technology.* 42:168–173
- Vega-Rojas L.J., Rojas-Molina I., Gutiérrez-Cortez E., Rincón-Londoño N., Acosta-Osorio A.A., Alicia Del Real-López A. y Rodríguez-García M.E. 2017. Physicochemical properties of nixtamalized corn flours with and without germ. *Food Chemistry.* 220:490–497.
- Vilmane L. y Straumite E. 2014. The Use of Soy Flour in Yellow Maize–Amaranth Gluten-free Bread Production. *Proc Latv Univ Agr.* 31.
- Wagner M.J., Lucas T., Le Ray D. y Trystram G. 2007. Water transport in bread during baking. *J Food Eng.* 78:67–73
- Wang S., Nie S. y Zhu F. 2016. Chemical constituents and health effects of sweet potato. *Food Research International.* 89:90-116
- Wanjuu C., Abong G., Mbogo D., Heck S., Low J. y Muzhingi T. 2018. The physiochemical properties and shelf life of orange-fleshed sweet potato puree composite bread. *Food Sci Nutr.* 6:1555–1563.
- Ward F.M. y Andon S.A. 2002. Hydrocolloids as film formers, adhesives and gelling agents for bakery and cereal products. *Cereal Food W.* 47:52–55
- Wild D., Robins G.G., Burley V.J. y Howdle P.D. 2010. Evidence of high sugar intake, and low fibre and mineral intake, in the gluten- free diet. *Aliment Pharmacol Ther.* 32:573–581

- Wilhelm E. 1993. En: Plant Polymeric Carbohydrates; Meuser F., Manners D.J., Seibel W. (Eds.). Royal Society of Chemistry: Cambridge, U.K. 180 pp.
- Yáñez E., Zacarias I., Granger D., Vasquez M. y Esteve A.M. 1994. Chemical and nutritional characterization of amaranthus (*Amaranthus cruentus*). Arch Latinoam Nutr. 44:57–62
- Zannini E., Pontonio E., Waters D. y Arendt E. 2011. Applications of microbial fermentations for production of gluten-free products and perspectives. Applied microbiology and biotechnology. 93:473-85.
- Zobel H.F. 1984. Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes. En: Whistler R., Bemiller J.N. y Paschall E.F. (Eds.). Starch Chemistry and Technology. Academic Press, Cambridge, Mass, USA. 285-309 pp.