



Universidad de Guanajuato
Campus Irapuato-Salamanca
División de Ciencias de la Vida
Maestría en Biociencias

“Efecto del uso de fructanos tipo agavinas como sustituto parcial de grasa y azúcar en productos panificables a base de harinas libres de gluten”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Biociencias

Presenta:

I.A. Elizabeth Nieto Mazzocco

Dirigido por:

Dr. César Ozuna López

Co-dirigido por:

Dr. Abel Cerón García

SINODALES

Dra. Adriana Saldaña Robles
Presidente

Firma

Dra. Elena Franco Robles
Secretario

Firma

Dr. César Ozuna López
Vocal

Firma

Irapuato, Gto. México

15 de febrero de 2019

**EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN SE REALIZÓ BAJO
LA DIRECCIÓN DEL DR. CÉSAR OZUNA LÓPEZ EN LOS
LABORATORIOS DE MICROBIOLOGÍA Y DE PROPIEDADES
FÍSICAS DE LOS ALIMENTOS DE LA DIVISIÓN DE CIENCIAS DE
LA VIDA EN LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO CON APOYO
DEL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
MÉXICO.**

RESUMEN

Actualmente, los productos panificables a base de harina de trigo son consumidos en forma masiva por la población. Sin embargo, existe un grupo poblacional que presenta intolerancia a las prolaminas presentes no sólo en el trigo, sino también en otro tipo de cereales. El gluten es uno de los agentes responsables de la estructura de la miga del pan, por lo que la sustitución de éste es un desafío para los tecnólogos en alimentos. Además, comercialmente, los productos libres de gluten proporcionan un nivel más bajo de proteína y fibra dietética en comparación con los productos elaborados con harina de trigo. Debido a lo anterior, existe una tendencia hacia el uso de fructanos tipo agavinas como un ingrediente funcional y prebiótico.

El objetivo general de esta investigación fue optimizar la concentración de fructanos tipo agavinas como sustituto parcial de grasa y azúcar en un producto panificable tipo muffin a base de una harina compuesta libre de gluten (sorgo, arroz y amaranto). La investigación se llevó a cabo en dos etapas, la primera consistió en estudiar el efecto de la concentración de cada una de las harinas que conforman la harina compuesta (sorgo, arroz y amaranto) sobre las propiedades físicas del producto final (altura, humedad, peso, color y perfil de textura) empleando un diseño de mezclas y una optimización por medio de la Metodología de Superficie de Respuesta utilizando el software Design-Expert V7.0. Con base en los resultados del diseño, para elaborar un producto panificable libre de gluten con características físicas similares al control elaborado con harina de trigo integral, las proporciones óptimas de harina de arroz, sorgo y amaranto fueron de 50%, 39% y 11%, respectivamente.

La segunda etapa consistió en evaluar la funcionalidad tecnológica del uso de agavinas del agave *Tequilana weber* azul como remplazo parcial de grasa y azúcar en un producto panificable tipo muffin libre de gluten (elaborado con 50% de harina de arroz, 39% de sorgo y 11% de amaranto) sobre las propiedades físicas del producto final (altura, humedad, peso, color y perfil de textura) empleando un diseño de mezclas y una optimización por medio de la Metodología de Superficie de Respuesta utilizando el software Design-Expert V7.0. Con base en los resultados

obtenidos del diseño, los valores óptimos para el azúcar, grasa y agavinas fueron 52%, 43% y 4.5%, respectivamente. Lo anterior muestra que es posible sustituir la harina de trigo integral por harinas compuestas libres de gluten en la preparación de productos panificables, con el menor impacto en las propiedades físicas y sensoriales. Además, es posible sustituir la grasa y el azúcar por fructanos tipo agavinas, sin que se vean afectadas las propiedades físicas, sensoriales y nutrimentales del producto final.

Palabras claves: Metodología de superficies de respuesta, Diseño de mezclas, Sorgo, Amaranto, Arroz, Fructanos.

ABSTRACT

Currently, breadmaking wheat flour products are consumed massively by the population. However, there is a population group that is intolerant to prolamins present not only in wheat, but also in other types of cereals. Gluten is one of the agents responsible for the crumb structure of bread, so replacing it is a challenge for food technologists. In addition, commercial gluten free products provide a lower level of protein and dietary fiber compared to products made with wheat flour. Because of this, there is a trend towards the use of fructans of agavin type as a functional prebiotic ingredient.

The general objective of this research was to optimize the concentration of agavin fructans as a partial substitute for fat and sugar in a bread product of muffin type based on a gluten-free composite flour (sorghum, rice, and amaranth). The research was carried out in two stages; the first consisted in studying the effect of the concentration of each of the flours that make up the composite flour (sorghum, rice, and amaranth) on physical properties of the final product (height, humidity, weight, color, and the texture profile), using a mix design and an optimization by means of Response Surface Methodology in the Design Expert V7.0 software. Based on the results of the design, in order to produce a gluten free bread product with physical characteristics similar to those of a control made with whole wheat flour, the optimum proportions of rice, sorghum, and amaranth flours were 50%, 39%, and 11%, respectively.

The second stage consisted of evaluating the technological functionality of the use of agavins from Agave Tequilana Weber variety Azul as a partial replacement of fat and sugar in a gluten free bread product of muffin type (made with 50% rice flour, 39% sorghum flour, and 11% amaranth flour) and its effects on the physical properties of the final product (height, humidity, weight, color, and the texture profile), using a mix design and an optimization by means of Response Surface Methodology in the Design Expert V7.0 software. Based on the results obtained from the design, the optimal values for sugar, fat, and agavins were 52%, 43%, and 4.5%, respectively. The results suggest that it is possible to substitute whole wheat flour

for gluten free composite flours in the preparation of bakery products with the least impact on their physical and sensory properties. In addition, it seems to be possible to substitute fat and sugar for agavin type fructans, without affecting the physical, sensory, and nutritional properties of the final product.

Keywords: Response Surface Methodology, Mix Design, Sorghum, Amaranth, Rice, Fructans.

DEDICATORIAS

Este trabajo representa el esfuerzo y el aliento no sólo de mi parte, sino también de mi familia y de una serie de personas que, conforme a lo largo de mi vida, me he topado en el camino, y han formado parte de mí.

Una pieza muy importante que me ha alentado a seguir adelante y no me deja decaer, mi hija Caroliz. Gracias mi niña por tu paciencia, apoyo, ánimos, carisma y fortaleza.

A mi esposo Erik, gracias por la confianza y estímulo que me has brindado, además, de tus consejos y apoyo.

A mi familia, ya que, sin ellos, no sería lo que hoy, a mi Papá por su apoyo incondicional, consejos y experiencia, a mi Mamá por su paciencia y dedicación, a mis hermanos por su complicidad y apoyo.

Agradezco a Dios por darme este gran regalo de vida, que son ustedes mi familia, lo mejor siempre ha sido tenerlos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guanajuato, en particular a la División de Ciencias de la Vida, por haberme dado la oportunidad de superarme académicamente al cursar la Maestría en Biociencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca (apoyo de CONACYT 451255) para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. César Ozuna, gracias por la motivación, entusiasmo, paciencia y confianza, que siempre me brindaste, y a su vez, tuviste en mí. Por haber aceptado que formara parte de tu equipo de trabajo. Eres una gran persona y se te estima.

A los Doctores Abel Cerón, Elena Franco y Adriana Saldaña, un agradecimiento muy especial a ustedes, por la confianza y paciencia que me tuvieron, así como la dedicación que siempre mostraron al trabajo realizado. Importantes aportes lo que cada uno de ustedes realizo.

ÍNDICE

Tabla de contenido

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
DEDICATORIAS	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE	vii
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS	xi
I.INTRODUCCIÓN	1
II.REVISIÓN DE LITERATURA	4
GENERALIDADES DE LOS CEREALES	4
Sorgo	4
Arroz	7
Amaranto	9
GENERALIDADES DE LOS FRUCTANOS	12
Fructanos: Estructura, fuente y síntesis.....	12
Aplicación de los fructanos en alimentos funcionales	15
Uso de fructanos como sustituto de grasa en productos alimentarios	18
Uso de fructanos como sustituto de azúcar en productos alimentarios	19
Otras aplicaciones de los fructanos	22
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN EN PRODUCTOS A BASE DE CEREALES	28
III. JUSTIFICACIÓN	30
IV. HIPÓTESIS	31
V. OBJETIVOS	32
Objetivo General.....	32
Objetivos Específicos.....	32
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	33
1. Localización.....	34
2. Ingredientes.....	34
3. Elaboración del producto panificable tipo muffin	35
Determinación de humedad (método 925.09).....	36

Determinación de cenizas (método 923.03)	36
Determinación de la grasa (método 920.39).....	37
Proteína total (método 960.52)	37
Contenido de fibra dietética (método 991.43)	38
4. Evaluación de las propiedades físicas.....	39
1.1. Peso y altura	39
Humedad	39
Color	40
Perfil de textura.....	40
Evaluación sensorial	41
5. Diseño experimental.....	43
Etapa 1	43
Etapa 2	43
Optimización	44
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
1. Etapa 1	45
7.1 Caracterización de las harinas (trigo integral y libres de gluten).....	45
7.2 Diagnóstico del modelo	46
7.2.1 Interacción de harinas libres de gluten	46
7.3 Verificación del modelo	54
7.4 Caracterización del producto control y del producto optimizado libre de gluten54	
2. ETAPA 2.....	60
7.5 Diagnostico del modelo	60
7.6 Verificación del modelo	72
7.7 Caracterización producto control (sin gluten) y el optimizado (libre de gluten, bajo en azúcar y grasa).....	73
VIII. CONCLUSIONES GENERALES	78
IX. CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA	79
X. BIBLIOGRAFÍA	80

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Uso de la inulina y/o oligofruktanos en alimentos	17
Tabla 2. Aplicaciones de inulina y/o oligofruktanos como sustitutos de grasa y azúcar en productos panificables	20
Tabla 3. Optimización de productos a base de cereales	29
Tabla 4. Análisis químico proximal de las harinas libres de gluten y harina de trigo integral.....	45
Tabla 5. Diseño de experimentos para la elaboración del producto panificable tipo muffin elaborado a base de harinas libres de gluten.	47
Tabla 6. Análisis de regresión de los modelos de segundo y tercer orden para las variables de respuesta analizadas. Donde A (harina de sorgo, %), b (harina de arroz, %) y c (harina de amaranto, %).	48
Tabla 7. Optimización numérica de la harina libre de gluten vs control	54
Tabla 8. Valores de las variables de respuesta del producto control (harina de trigo integral) y del producto optimizado elaborado con harinas libres de gluten....	55
Tabla 9. Análisis químico proximal del producto final optimizado (harina compuesta libre de gluten) y el control (harina de trigo integral).	57
Tabla 10. Diseño experimental para el uso de agavinas como remplazo de grasa y azúcar en productos panificables tipo muffin libres de gluten.....	61
Tabla 11. Análisis de regresión de los modelos de tercer orden para las variables de respuesta analizadas. Donde A (azúcar, %), b (grasa, %) y c (agavinas, %).	62
Tabla 12. Restricciones asignadas para la optimización numérica de las variables del proceso.	71
Tabla 13. Optimización numérica obtenida para el producto control (harinas compuesta libre de gluten) vs el producto optimizado (sin gluten, bajo en grasa y azúcar)	72
Tabla 14. Valores experimentales del producto elaborado con 52% de azúcar, 43% de grasa y 4.5% de agavinas frente a los valores óptimos pronosticados por los modelos.	73

Tabla 15. Valores de las variables de respuesta del control (harina compuesta libre de gluten) y optimizado (producto funcionalizado libre de gluten y bajo contenido en grasa y azúcar).....	74
Tabla 16. Análisis químico proximal del producto final (optimizado y control)	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la planta de sorgo-----	4
Figura 2. Estructura del grano de sorgo. Sección longitudinal (Arendt y Zannini, 2013)-----	5
Figura 3. Estructura de la planta de arroz -----	8
Figura 4. Estructura del grano de arroz. Sección longitudinal (Torró, 2011) -----	9
Figura 5. Estructura de la planta de amaranto -----	10
Figura 6. Estructura del grano de amaranto. Sección longitudinal-----	11
Figura 7. Comparación estructural de la a) inulina de <i>Cichorium intybus</i> y b) agavina de <i>Agave</i> spp (Franco-Robles y López, 2015)-----	14
Figura 8. Diagrama de la metodología a seguir en el desarrollo experimental de la investigación. -----	33
Figura 9. Efecto de interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la altura del producto panificable tipo muffin. -----	49
Figura 10. Efecto de interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la humedad del producto panificable tipo muffin. -----	50
Figura 11. Efecto de interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la luminosidad de la miga del producto panificable libre tipo muffin. -----	51
Figura 12. Efecto de la interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la dureza del producto panificable tipo muffin. -----	53
Figura 13. Las imágenes de (a) control harina de trigo integral, (b) el producto optimizado hecho con harina compuesta y los productos finales en los cuales el 100% de la harina de trigo integral se sustituyó por (c) harina de sorgo, (d) harina de arroz, y (e) harina de amaranto. -----	56
Figura 14. Atributos sensoriales del producto panificable control (harina de trigo integral) y el optimizado (harinas libres de gluten) -----	58
Figura 15. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la altura del producto panificable libre de gluten tipo muffin. ----	63
Figura 16. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre el peso del producto panificable libre de gluten tipo muffin. ----	64

Figura 17. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la luminosidad (a) y la coordenada cromática a* (b) de la corteza del producto panificable libre de gluten tipo muffin. -----	65
Figura 18. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la luminosidad (a), coordenada cromática a* (b) y coordenada cromática b* (c) de la miga del producto panificable libre de gluten tipo muffin. -----	67
Figura 19. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la elasticidad (a), cohesividad (b), masticabilidad (c) y gomosidad (d) del producto panificable libre de gluten tipo muffin. -----	68
Figura 20. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la dureza del producto panificable libre de gluten tipo muffin. --	69
Figura 21. Producto elaborado con la harina compuesta libre de gluten (a), producto optimizado libre de gluten y bajo en azúcar y grasa (b), productos elaborados con 100% harina de sorgo (c), harina de arroz (d), y harina de amaranto (e). -----	75
Figura 22. Atributos sensoriales del producto panificable control (harina de trigo integral) y el optimizado (harinas libres de gluten) -----	77

I.INTRODUCCIÓN

La reducción de grasa y azúcar en la dieta es una tendencia actual de los consumidores (García, Estepa, y Torres, 2008; Piñero *et al.*, 2008; Valencia García, Millán Cardona, y Ramírez Herrera, 2008; de Moura *et al.*, 2011). Esto es debido a que el exceso en el consumo de estos nutrimentos está relacionado con la presencia de numerosas enfermedades crónico-degenerativas tales como la diabetes y la obesidad (Brennan y Cleary, 2005; Chamorro y Mamani, 2015). Además, debido al creciente número de pacientes diagnosticados con enfermedad celíaca se ha incrementado la demanda por alimentos libres de gluten (Sapone *et al.*, 2012). La enfermedad celíaca está caracterizada por la intolerancia al gluten (proteína almacenada en la semilla) presentes en la mayoría de los cereales reconocida como una enteropatía autoinmune (Shepherd. y Gibson, 2012).

El consumo de cereales que contienen gluten, una pequeña secuencia de aminoácidos encontrada en la fracción de prolamina de trigo (gliadina), centeno (secalina), cebada (hordeína) y posiblemente avena (avidinas), provoca un proceso inflamatorio crónico que conduce a lesiones en el intestino delgado y una disfunción en la absorción de nutrientes (Sánchez *et al.*, 2002; Schuppan *et al.*, 2005; Turabi *et al.*, 2010). Sin embargo, el gluten es la principal estructura proteica presente en harinas que se usan en la preparación de diferentes productos de panadería y es responsable de las características elásticas de la masa y contribuye a la apariencia y estructura de la miga de muchos productos horneados (Gallagher *et al.*, 2004). Por lo tanto, la sustitución del gluten y el desarrollo de alimentos con un alto contenido en fibra dietética y un aporte calórico bajo, es uno de los problemas más desafiantes para la ciencia y la tecnología en la obtención de productos panificables libres de gluten y con una composición nutricional muy similar a los existentes en el mercado (Capriles *et al.*, 2016).

Para mejorar la calidad y el valor nutricional de los productos panificables, se realiza la incorporación de aditivos, prebióticos como los fructanos tipo agavinas, así como de diferentes tipos de cereales y pseudocereales como el sorgo, arroz, amaranto, quinua, arroz integral, entre otros (Álvarez-Jubete *et al.*, 2009; Moroni *et al.*, 2009),

mejorando con ello el rendimiento de cocción y las propiedades físicas y sensoriales (Lamacchia *et al.*, 2014).

El sorgo es el quinto cultivo más importante del mundo después del maíz, el arroz, el trigo y la cebada. Este cereal, de la misma familia (*Poaceae*) y originario de África, es considerado resistente a las elevadas temperaturas y condiciones de sequía que pueden surgir debido al cambio climático (Taylor, Schober, y Bean, 2006; FAO, 2012). Además, se ha reconocido el potencial tecnofuncional del sorgo debido a su baja digestibilidad de almidón en comparación con otras proteínas de cereales (Duodu *et al.*, 2003), altos niveles polifenólicos y capacidad antioxidante para el desarrollo de alimentos funcionales para la protección contra el riesgo de enfermedades crónicas (Yousif *et al.*, 2012). Este grano tiene un alto contenido de proteína, que no contiene gluten (Ciacci *et al.*, 2007) y posee una gran cantidad de minerales y fibra (Ahmed *et al.*, 2014). El sorgo se utiliza en la preparación de muchos alimentos tradicionales y en productos panificables como pan, pastel, muffins y galletas; también es una fuente potencialmente importante de nutraceuticos, como fenoles antioxidantes y ceras reductoras del colesterol (Ratnavathi y Patil, 2013).

Por otro lado, el arroz es rico en carbohidratos fácilmente digeridos y proporciona proteínas libres de gluten, grasas y fibra, además de vitaminas y minerales (Ji *et al.*, 2007; Turabi *et al.*, 2010). Sin embargo, tiene una baja capacidad de retención de gas que se ve reflejado en productos con un bajo volumen, una textura, color y estructura de miga deficientes. Respecto al amaranto, la calidad nutricional de las semillas tiene un alto contenido proteico y una composición equilibrada de aminoácidos esenciales (Oszvald *et al.*, 2009). De hecho, la proteína del grano de amaranto es rica en lisina que generalmente es deficiente en otros cereales. En este sentido, se caracteriza por el alto contenido de fibra y lípidos y es rico en calcio y magnesio (Álvarez-Jubete *et al.*, 2009).

Los fructanos son polímeros compuestos de unidades repetidas de fructosa con una unidad de glucosa terminal o interna. Éstos forman parte de los hidratos de carbono de reserva de diversas plantas, incluyendo la familia *Agavaceae*, a la cual pertenece

el género *Agave* (López *et al.*, 2003). El uso de fructanos como ingrediente alimentario ha incrementado en las últimas fechas debido a sus beneficios como prebiótico natural, fibra dietética y por sus funciones tecnológicas (reemplazo de azúcar, grasa, estabilizantes, entre otros) (Espinosa-Andrews y Urias-Silvas, 2012). Sin embargo, para poder adicionar nuevos ingredientes en la formulación en un producto alimentario es necesario recurrir a ciertas estrategias que permitan predecir el comportamiento de éstos en las propiedades físicas, nutritivas y sensoriales del alimento.

La optimización de los productos panificables puede realizarse mediante la metodología de superficie de respuesta, la cual es una herramienta estadística y matemática utilizada para el desarrollo, mejora y optimización de procesos (Montgomery, 2004). La metodología de superficie de respuestas describe el efecto de las variables independientes sobre las variables dependientes en el proceso y genera un modelo matemático (Myers, Montgomery, Vining, Borror, y Kowalski, 2004). El objetivo es relacionar las propiedades del producto con ecuaciones de regresión que describen la relación entre las variables de procesamiento y de respuesta. Otra aplicación de esta metodología es en el desarrollo eficiente de procesos y en la reducción de costos (Brennan y Samyue, 2004). Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación fue optimizar la concentración de fructanos tipo agavinas como sustituto parcial de grasa y azúcar en un producto panificable tipo muffin funcionalizado a base de una harina compuesta libre de gluten (sorgo, arroz y amaranto).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

GENERALIDADES DE LOS CEREALES

El término cereal proviene del latín *cerealis*, que significa "grano", un tipo de fruto llamado cariopsis, compuesta por el endospermo, el germen y el salvado. Los cereales pertenecen a la familia de las hierbas, una familia de monocotiledóneas *Poaceae*, también conocida como *Gramínea*. Las gramíneas generalmente tienen tallos largos y delgados, por ejemplo, el trigo, arroz, maíz, sorgo, mijo, cebada y centeno. Además, sus granos almidonosos se utilizan como alimento. El término cereal no se limita a estos granos, sino que también se refiere a los alimentos procesados a partir de ellos como harinas, panes y pastas (Sarwar *et al.*, 2013).

Sorgo

El sorgo es una planta de verano auto-polinizante, perteneciente a la familia de las *Poaceae* (Stefoska-Needham *et al.*, 2015). La planta tiene una altura de 1 a 2 m, tiene una inflorescencia en panoja y semilla de 3 mm. Los granos de sorgo generalmente son esféricos o fusiformes y pueden ser de color blanco, rojo, amarillo o marrón; su sistema radicular que puede llegar hasta 2 m de profundidad en terrenos permeables (Figura 1) (Surco Almendras y Alvarado Kirigin, 2010; Espitia *et al.*, 2015).

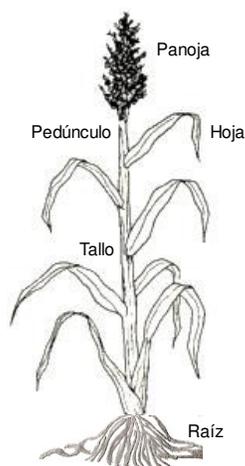


Figura 1. Estructura de la planta de sorgo

La estructura de grano de sorgo está conformada por el pericarpio o cobertura del grano (recubrimiento exterior), la testa está ubicada entre el pericarpio y el endospermo (que puede o no estar presente), el endospermo y el embrión (Figura 2) (Maxon *et al.*, 1971; FAO, 1999). La forma, tamaño, proporción y peculiaridades de estas partes del grano de sorgo, el color del pericarpio y la presencia o no de testa están determinadas genéticamente (Espitia *et al.*, 2015).

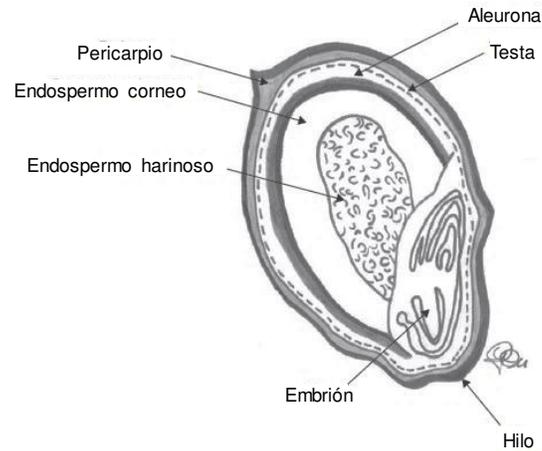


Figura 2. Estructura del grano de sorgo. Sección longitudinal (Arendt y Zannini, 2013)

El pericarpio se subdivide en epicarpio, mesocarpio y endocarpio. El epicarpio es la parte externa y está compuesta por dos o tres capas de células. Por otro lado, el mesocarpio está situado debajo del epicarpio y su espesor puede variar. Los granos de apariencia opaca poseen un mesocarpio grueso y éste contiene gránulos de almidón, mientras que los granos translúcidos o perlados, el mesocarpio es muy fino y no contienen gránulos de almidón (Earp *et al.*, 1983).

El color del pericarpio varía de blanco, amarillo limón, a marrón. Los sorgos marrones genéticamente rojos, pero con presencia de testa (capa pigmentada), poseen taninos en su composición, los cuales afectan la calidad nutricional del grano. Los taninos son polifenoles de alto peso molecular, algunos de éstos son conocidos como condensados y forman complejos con proteínas y/o proteasas. El efecto negativo de los taninos sobre el valor nutricional se puede superar mediante la eliminación de la testa mediante un tratamiento alcalino o por una acción

mecánica. En ciertos alimentos y bebidas tradicionales, los compuestos fenólicos del sorgo rojo dan un sabor y color deseados (Chanterreau y Nicou, 1994).

El endospermo está compuesto por la capa de aleurona y de las porciones periférica, córnea y harinosa. Esta capa constituye hasta un 82% de la porción total del grano. Dentro de los tipos de endospermo, el normal o no ceroso tiene 75% de amilopectina y 25% de amilosa; mientras que el endospermo ceroso tiene casi 100% de amilopectina. El almidón ceroso tiene propiedades de cocción y gelatinización, características que son importantes en la industria de alimentos. Finalmente, el embrión o germen constituye cerca del 10% del peso seco del grano y consiste en el eje embrionario y contiene el mayor porcentaje de proteínas, lípidos y minerales. El embrión y el pericarpio tienen un contenido de 3 a 4 veces mayor de lisina que el endospermo (Domanski *et al.*, 1997).

Con respecto a su composición nutrimental, el sorgo tiene una menor digestibilidad del almidón en comparación con otros cereales como el maíz, arroz, trigo y cebada, aunque el grado de digestibilidad depende mucho del método de procesamiento al que sea sometido (Duodu *et al.*, 2003; Ezeogu *et al.*, 2005). Debido a lo anterior, las proteínas del sorgo se ven disminuidas porque son más resistentes a la digestión (Duodu *et al.*, 2003) y presentan bajos niveles de aminoácidos esenciales como lisina, triptófano y treonina (Badi *et al.*, 1990). Los granos de sorgo constituyen una buena fuente de vitaminas del grupo B (como la tiamina, riboflavina, vitamina B₆, biotina y niacina); también contienen tocoferoles que se concentran en el germen y en el salvado. Los minerales más abundantes en este cereal son fósforo y potasio y se localizan principalmente en el pericarpio, entre los micronutrientes el más abundante es el hierro (Hernández, 2010).

Por todo lo expuesto anteriormente, el grano de sorgo es un producto que juega un papel importante en el sector agropecuario por su resistencia a la sequía y a las altas temperaturas, además de emplearse como grano y forraje (Espitia *et al.*, 2015). Sin embargo, en la actualidad se conocen otros usos que se enlistan a continuación (Ratnavathi y Patil, 2013; SAGARPA, 2016):

- a) Harina: utilizada generalmente para elaborar productos panificables (galletas, bísquet, varios tipos de pan, pasteles, pastas).
- b) Aceite: semejante al del maíz, contiene una mayor proporción de cera.
- c) Malta: para la elaboración de cerveza sin alcohol a base de sorgo malteado. Tiene un sabor agrio y una consistencia espesa, se ingiere en muchas partes del mundo.
- d) Alcohol etílico: es el principal constituyente psicoactivo en las bebidas alcohólicas.
- e) Jarabe: uso en la industria láctea y confitería como edulcorante. Además de utilizarlo como miel durante el desayuno.

Arroz

El género *Oryza* comprende veinte especies silvestres y dos cultivadas dentro del grupo sativa (*O. sativa* y *O. glaberrima*) (Vaughan *et al.*, 2003). *Oryza sativa*, aunque originaria del trópico húmedo de Asia, se cultiva en todo el mundo; mientras que, *Oryza glaberrima* se ha cultivado en el África Occidental durante los últimos 3500 años (Rosell *et al.*, 2007).

La planta de arroz posee órganos vegetativos (tallos, hojas y raíces) y órganos reproductivos (flores y semillas). El tallo es redondo y está compuesto por nudos y entrenudos que se alargan durante la fase vegetativa hasta la floración y puede medir entre 0.5 y 1.8 m de altura. Sin embargo, es deseable que el tallo sea lo más corto posible para mantenerse erecto. Cada nudo en el tallo tiene una hoja, en cuya axila se encuentra una yema, que puede dar lugar a un hijuelo o vástago, éste último es variable según la variedad.

En las hojas se distingue la vaina, el limbo o lámina, língula y las aurículas. La última hoja de cada vástago se denomina hoja bandera y su vaina envuelve el cuello de la panícula. La hoja bandera y la inmediatamente anterior son determinantes para la formación de la panícula de 20 a 40 cm de largo. Cada panícula se compone de entre 50 y 300 flores o espiguillas, a partir de las cuales se formarán los granos (Figura 3) (Torró, 2010).

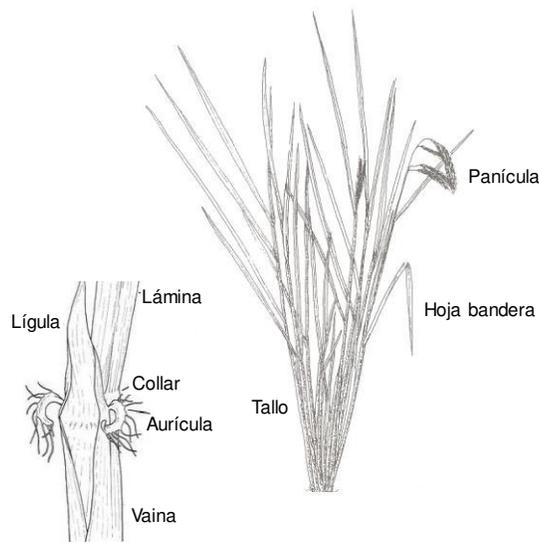


Figura 3. Estructura de la planta de arroz

La semilla del arroz está constituida por una cariósida y una cáscara que la recubre constituida por dos glumas florecientes, conocidas como lema y palea. La superficie externa de la cáscara está recubierta por numerosos tricomas. Entre la cascarilla y cariósida existe un espacio cuyo tamaño depende de la variedad del arroz, la capa exterior de la cariósida se llama pericarpio que es la envoltura que protege a la semilla y está dividida en tegmen, aleurona y endospermo amiláceo. Finalmente, el germen se halla en una concavidad en la región abdominal inferior del grano, adherido al endospermo (Figura 4) (Muñoz, 2015).

La composición de los granos de arroz depende en gran medida de la variedad, de las condiciones medioambientales y del proceso a que se le someta. Sin embargo, los hidratos de carbono son los constituyentes más abundantes en este cereal, con un contenido aproximado de almidón del 80% (14% humedad) (Fitzgerald, 2004). La proteína es el segundo constituyente más abundante en el arroz, con valores situados entre 6.3-6.7%, encontrando la mayor cantidad en el endospermo. Los aminoácidos esenciales más abundantes en las proteínas de arroz son: ácido glutámico, ácido aspártico, leucina y arginina, seguidos de alanina, valina, fenilalanina y serina; y, deficiente en el aminoácido esencial lisina (Rosell et al., 2007).

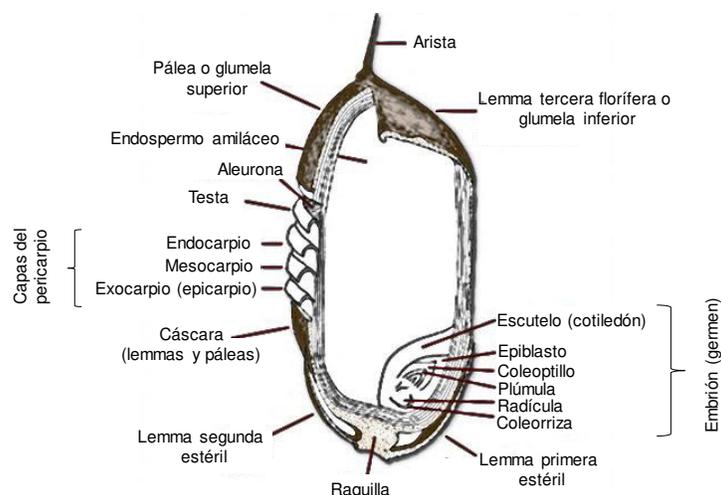


Figura 4. Estructura del grano de arroz. Sección longitudinal (Torró, 2011)

El contenido de lípidos es inferior que el del almidón y proteínas, por lo que es considerado un constituyente minoritario, así como la fibra y los minerales (hierro, fósforo, magnesio, y potasio). Al igual que el resto de los cereales, el arroz es fuente de vitamina B (riboflavina, tiamina y vitamina B₆). Desde el punto de vista nutritivo y dado su alto consumo, el arroz proporciona el 27% de la ingesta calórica en los países en vías de desarrollo y tan sólo el 4% en los países desarrollados (Rosell *et al.*, 2007).

Amaranto

El grano de amaranto pertenece al orden de las *Caryophyllales*, a la familia de las *Amaranthaceae* y al género *Amaranthus* (Sauer, 1967). El género *Amaranthus* incluye aproximadamente 70 especies, la mayoría son de origen americano y 15 de ellos, su origen es en Europa, Asia, África, entre otras (Peralta, 2009). Aunque muchas especies son consideradas oportunistas, solamente cuatro de ellas (*A. hypochondriacus*, *A. spinosus*, *A. caudatus* y *A. cruentus*) pueden ser destinadas a consumo humano (Gamel *et al.*, 2006; Sangameswaran y Jayakar, 2008).

El grano de amaranto es una planta herbácea anual, una de las pocas dicotiledóneas, con un tallo erecto y una enorme inflorescencia de varios colores (Figura 5). Algunas características anatómicas y su trayectoria de fotosíntesis

contribuyen a la amplia adaptabilidad geográfica del cultivo a diversas condiciones ambientales (Kigel, 2018).



Figura 5. Estructura de la planta de amaranto

Las tres especies de grano del amaranto, *Amaranthus hypochondriacus*, *A. cruentus* y *A. caudatus*, se pueden distinguir por el tipo de inflorescencia y por algunos caracteres de estructuras de flores pistiladas como lo son la longitud, nitidez y posición de la bráctea; así como la forma de tepal y utrículo, morfología foliar y morfología macroscópica de la planta. La semilla del amaranto es lenticular y relativamente pequeña (0.9 a 1.7 mm de diámetro) (Sauer, 1967; Kigel, 1994) El color de la semilla en el amaranto varía de blanco, dorado, marrón y rosa a negro.

La estructura del grano de amaranto se encuentra dividida en las siguientes capas (Figura 6):

- a) Pericarpio: es una capa delgada y única, la cual contiene en el exterior el pigmento que proporciona el color a la semilla. El pericarpio es rico en calcio, sodio y magnesio.
- b) Perispermo: está localizado en el centro de la semilla y consiste en una pared delgada del parénquima celular. Esta capa aleurónica está firmemente unida con la envoltura de la semilla, aunque es susceptible de separar por abrasión. El principal componente del perispermo es el almidón que es el más

abundante de los carbohidratos en la semilla y representa cerca del 50 al 60% de su peso seco. El almidón está constituido por amilopectina y solo 5-7% de amilosa.

- c) Endocarpio (germen o embrión): ubicado en la periferia del perispermo de uno de sus lados. En las células del parénquima del embrión están ubicados los cuerpos proteínicos que mide de 3 a 5 micras de diámetro (Figura 6). En el embrión se ha encontrado más nutrientes como grasa, fibra, cenizas, de 2.3 a 2.6 veces más nitrógeno y de 2.4 a 2.5 veces más contenido de minerales, especialmente hierro y cobre, que en el resto de la semilla.
- d) Endospermo: en esta capa se ubican los cuerpos proteínicos cuyo diámetro está entre 1.5 y 2.4 micras (CARPIO, 2009) (Figura 6).

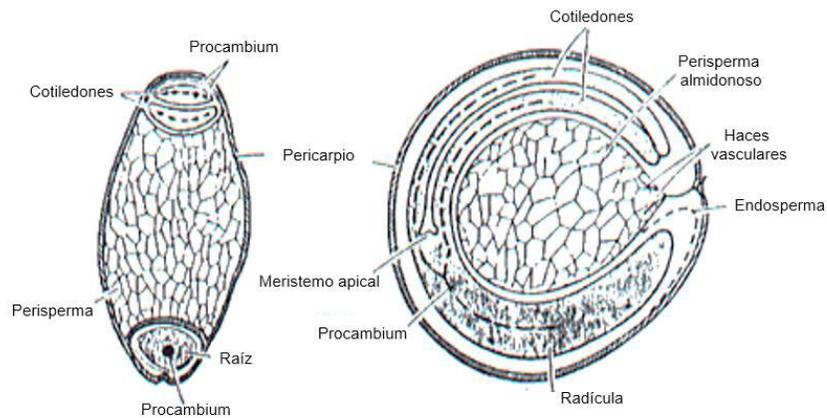


Figura 6. Estructura del grano de amaranto. Sección longitudinal

La calidad nutricional del grano de amaranto se considera superior a la de otros cereales, tales como el trigo, cebada o arroz (Oszvald *et al.*, 2009). El amaranto es una fuente importante de proteína que oscilan entre un 15 a un 18%, pero su importancia no radica solo en la cantidad, sino también en la calidad de su proteína, ya que este cuenta con un excelente balance de aminoácidos (ante todo los esenciales). Además, el amaranto aporta cantidades suficientes de fibra dietética, vitamina B, vitamina E y puede ser una fuente significativa de niacina, así como de fósforo y magnesio (Rastogi y Shukla, 2013).

Otra de las peculiaridades es que la semilla de amaranto es baja en contenido de lípidos (7 a 8%), lo que representa para el ser humano una disminución en

enfermedades cardiovasculares (Huerta-Ocampo y Barba de la Rosa, 2012). A su vez, el grano de amaranto no posee gluten y tiene efectos antioxidantes, por lo que, puede contribuir en el tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas como la enfermedad celíaca (Porr y Alegre, 2012). Por este motivo en las últimas décadas, el amaranto ha logrado captar un creciente interés como ingrediente funcional, en especial en procesos de panificación, debido a que es muy versátil para la transformación e industrialización (Mujica-Sánchez *et al.*, 1997; Zapotoczny *et al.*, 2006; Jacobsen *et al.*, 2002).

GENERALIDADES DE LOS FRUCTANOS

Los carbohidratos son componentes esenciales para todos los organismos vivos. La unidad básica de los carbohidratos se conoce como monosacáridos o azúcares simples. Los oligo y polisacáridos consisten en monosacáridos unidos covalentemente. El almidón es el carbohidrato de reserva en las plantas superiores más ampliamente distribuido, seguido de la sacarosa, glucomanos y fructanos (Mancilla-Margalli y López, 2006). Sin embargo, aproximadamente el 15% de las plantas con flores almacenan fructanos como una reserva en al menos uno de sus órganos durante su ciclo de vida (Kaur y Gupta, 2002; Laere y Ende, 2002), siendo este último polisacárido de gran interés en el desarrollo de esta investigación.

Fructanos: Estructura, fuente y síntesis

Los fructanos se encuentran en diversas plantas como hidratos de carbono de almacenamiento y se emplean para mejorar la tolerancia al frío y sequía de las plantas (Ritsema y Smeekens, 2003). Estos son polímeros de fructosa derivados de la molécula de sacarosa son también considerados polisacáridos no reductores, solubles en agua, combinados por residuos de β -fructofuranosil que resisten la digestión humana (Ulloa *et al.*, 2010).

La estructura de estos puede ser lineal o ramificada y en algunas ocasiones se les puede encontrar en forma cíclica (Wang *et al.*, 2002; López *et al.*, 2003). Con base en lo anterior se han identificado cinco principales tipos de fructanos entre los que

destacan las inulinas tipo fructanos, levanos, graminanos, inulinas neoserie y levanos neoserie (Vijn y Smeekens, 1999; Apolinário *et al.*, 2014).

Los fructanos tipo inulina (ITF), también conocidos como inulinas, oligofructanos, fructooligosacáridos y fructanos (Kelly, 2008), son los fructanos más simples y están constituidos por moléculas de fructosa unidos por enlaces β (2 \rightarrow 1) glicosídicos fructosil-fructosa. Los ITF están presentes entre las unidades de fructosa de la inulina y β - configuración del carbono anomérico, haciendo que éste no sea digerido en el intestino delgado del ser humano y pueda ser fermentado en el intestino grueso por la microbiota intestinal (Apolinário *et al.*, 2014). Los ITF difieren en el grado de polimerización y estructura (Suzuki y Chatterton, 1993; Roberfroid, 2005; Oyarzábal *et al.*, 2009). Esta molécula se encuentra principalmente en dicotiledóneas y ha sido más estudiada en *Asteraceae* como achicoria (*Cichorium intybus*), alcachofa de Jerusalem (*Helianthus tuberosus*), alcachofa (*Cynara scolymus*), diente de león (*Taraxacum officinale*), dalia (*Dahlia variabilis*) y yacon (*Polymnia sonchifolia*) (Laere y Ende, 2002; Ulloa *et al.*, 2010).

Los levanos, o específicamente fleína cuando se refiere a plantas contienen un polímero de fructosa lineal β (2 \rightarrow 6). Éstos se encuentran en pastos como *Phleum pratense* y *Dactylis glomerata*. En general, ciertas bacterias gram positivas como gram negativas son productoras de fructanos con este tipo de estructura, pocas excepciones como *Streptococcus mutans*, *Lactobacillus reuteri* y *Leuconostoc citreum* son productoras de inulinas (Chatterton y Harrison, 1997; Wei *et al.*, 2002; Ulloa *et al.*, 2010).

Los fructanos tipos graminanos, contienen ambos tipos de enlace β (2 \rightarrow 1) y β (2 \rightarrow 6). Por lo general son estructuras ramificadas con bifurcosa como unidad básica. Se encuentra en algunas plantas monocotiledóneas pertenecientes a las familias *Poaceae*, *Alliaceae*, *Asparagaceae*, *Agavaceae*, *Amaryllidaceae*, *Haemodoraceae* e *Iridaceae* y los pastos templados (*Poaceae*). Los fructanos tipo graminanos forman una estructura que varía del levano lineal a un levano más ramificado por mencionar el trigo (*Triticum aestivum*), cebada (*Hordeum vulgare*) (Pavis *et al.*, 2001), *Avena sativa*, *Lolium* sp., y *Agave* sp. (Livingston *et al.*, 1993;

Pavis *et al.*, 2001; Mancilla-Margalli y López, 2006; Ulloa *et al.*, 2010; Franco-Robles y López, 2015).

Las inulinas neoserie contienen unidades fructosil con enlaces β (2 \rightarrow 1) unidas tanto al carbono 1 como al 6 de la molécula de sacarosa. Esto resulta en un polímero de fructano con una cadena de fructosa (mF21F2-6G1-2F1-2Fn), F (Fructosa), G (Glucosa), en ambos extremos de la molécula de glucosa. La inulina neoserie más pequeña, es la neocestosa. Este tipo de fructanos se encuentran en plántulas pertenecientes a la familia de *Liliaceae* (cebolla y esparrago) (Vijn y Smeekens, 1999; Franco-Robles y López, 2015). Los miembros de *Alliaceae* y *Asparagaceae*, *Agave tequilana* también producen neoserias de inulina (Ulloa *et al.*, 2010). Por esta razón, los fructanos del Agave que pueden tener una glucosa interna y externa, característica de este tipo, se les ha llamado “agavinas” (Figura 7) (Mancilla-Margalli y López, 2006).

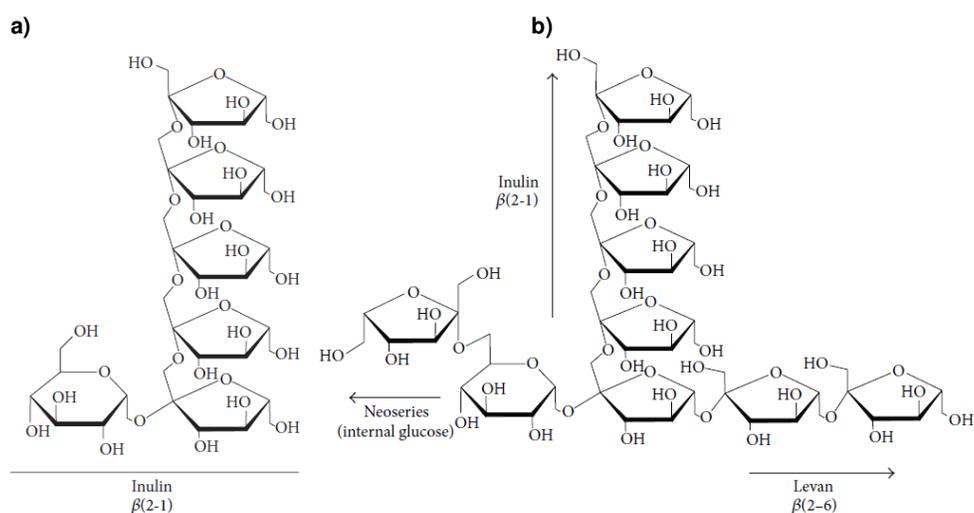


Figura 7. Comparación estructural de la a) inulina de *Cichorium intybus* y b) agavina de *Agave* spp (Franco-Robles y López, 2015)

Las neoserias de levano consisten en polímeros con predominantemente residuos de fructosilo unidos a β (2 \rightarrow 6) en cualquier extremo del resto de glucosa de la molécula de sacarosa. Estos fructanos son raros, aunque se han encontrado en unas pocas especies de plantas que pertenecen a los papales (por ejemplo, la avena) (Livingston *et al.*, 1993; Pavis *et al.*, 2001a).

La inulina y levanos son los fructanos con un grado de polimerización más largos encontrados en la naturaleza, este grado de polimerización está entre 30 y 50 residuos de fructosil, pero en ocasiones se puede exceder hasta 200. La inulina almacenada en raíz de achicoria (*Chicorium intybus*) y en tubérculos como la alcachofa (*Helianthus tuberosus*) tienen un promedio de grado de polimerización más bajo, aproximadamente de 10 a 30. Sin embargo, el mayor grado de polimerización ha sido encontrado en alcachofa globo (*Cynara scolymus*) llegando arriba de 200 residuos de fructosa (Ulloa *et al.*, 2010). Además, de la raíz del cacao, otra fuente importante de fructanos lo podemos encontrar en la variedad *Agave tequilana* Weber azul, especie económicamente cultivada en México. Debido a la alta concentración de inulinas, presentes específicamente en la cabeza, es la razón por la cual es considerada la única variedad de la familia de las *Agavaceae*, para la fabricación de tequila (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2001).

Así, los fructanos pueden clasificarse de acuerdo a su grado de polimerización en pequeños (2 a 4), medianos (5 a 10) y relativamente largos (11 a 60 unidades de fructosa) (Vijn y Smeekens, 1999; Carabin y Flamm, 1999). De acuerdo con lo anterior, los fructanos tienen una amplia variedad de aplicaciones, tal es el caso de los fructanos que cuentan con un grado de polimerización bajo (oligofructanos). Éstos son más solubles y presentan un sabor dulce, por lo que se pueden utilizar para remplazar el azúcar y mejorar la sensación en la boca de los productos con bajo contenido calórico, mientras los que tienen un grado de polimerización alta (inulina), muestran una alta viscosidad y termoestabilidad, que pueden ser utilizados como remplazo de grasa. Por lo expuesto anteriormente, existe un gran interés por parte de la industria de alimentos para emplearlos como ingredientes alimenticios bajos en calorías (Vijn y Smeekens, 1999; Franck, 2002; Guggisberg *et al.*, 2009; Tárrega *et al.*, 2010).

Aplicación de los fructanos en alimentos funcionales

Los alimentos funcionales son aquellos que se consumen como parte normal de una dieta y que contienen componentes biológicamente activos que ofrecen beneficios a la salud y reducen el riesgo de sufrir enfermedades. Más del 60% de

los alimentos funcionales en todo el mundo son dirigidos a la salud intestinal y explorándose ciertos beneficios terapéuticos adicionales (Ulloa *et al.*, 2010; Franco-Robles y López, 2015). De esta forma, los fructanos han incursionado en diferentes productos alimenticios debido a diversos usos tecnológicos que vienen determinados con base en sus características estructurales tales como su grado de polimerización (bajo aporte calórico, edulcorante, sustituto de grasa, emulsionante y texturizador) y su fuente de origen (Tungland y Meyer, 2002; Sosa-Herrera *et al.*, 2016).

La inulina es de gran interés en el sector alimentario para desarrollar productos saludables debido a que responden a ciertos requerimientos del consumidor tales como el consumo de fibra dietética, prebióticos, sustitutos de grasa y azúcar (Franck, 2002). Las dos especies vegetales que son utilizadas en la industria para la obtención de inulina y fructooligosacáridos, pertenecen a la familia *Asteraceae*, estas especies son alcachofa (*Helianthus tuberosus*) y achicoria (*Chicorium intibus*), siendo la última la más comúnmente utilizada (De Bruyn *et al.*, 1992).

Por otro lado, los fructanos tipo agavinas obtenidos de *A. tequilana* son altamente ramificados con ambos tipos de enlace β (2 \rightarrow 1) y β (2 \rightarrow 6) y con un grado de polimerización que oscila de 3 a 30 unidades de monosacáridos (López *et al.*, 2003; Arrizon, Morel, Gschaedler, y Monsan, 2010; Gomez, Tuohy, Gibson, Klinder, y Costabile, 2010). Sin embargo, su aplicación tecnológica como un ingrediente funcional se encuentra en estudio (Crispín-Isidro, Lobato-Calleros, Espinosa-Andrews, Alvarez-Ramirez, y Vernon-Carter, 2015).

La inulina presenta propiedades muy similares al almidón, mientras que los oligofructanos como la sacarosa (Roberfroid, 2002; Rodríguez, Jiménez, Fernández-Bolaños, Guillén, y Heredia, 2006). Debido a lo anterior, la inulina y sus derivados ofrecen múltiples usos como ingredientes en la formulación de diferentes productos alimenticios (Tabla 1)

Tabla 1. *Uso de la inulina y/o oligofruktanos en alimentos*

APLICACIONES	FUNCIONALIDAD	REFERENCIAS
Productos horneados	Sustituto de azúcar Retención de humedad Fibra y prebiótico	(Nieto-Nieto, Wang, Ozimek, y Chen, 2015; Rodriguez Furlán, Padilla, y Campderrós, 2014)
Productos lácteos	Sustituto de grasa y azúcar Estabilidad de la espuma Cuerpo y palatabilidad Fibra dietética y prebiótico	(Meyer, Bayarri, Tárrega, y Costell, 2011)
Chocolate	Sustituto de azúcar y grasa Resistencia al calor (comportamiento de fusión)	(Aidoo, Afoakwa, y Dewettinck, 2014)
Productos dietéticos y sustituto de comida	Sustituto de azúcar y grasa Reducido aporte calórico Cuerpo y palatabilidad Fibra y prebiótico	(Brambillasca, Zunino, y Cajarville, 2015; Tiengtam, Khempaka, Paengkoum, y Boonanuntanasarn, 2015)
Productos cárnicos	Sustituto de grasa Textura y estabilidad de la fibra	(Keenan, Resconi, Kerry, y Hamill, 2014; Rodríguez-García, Sahi, y Hernando, 2014)
Preparados de frutas	Sustituto de azúcar Cuerpo y palatabilidad Fibra y prebiótico Capacidad para formar gel	(Krasaekoopt y Watcharapoka, 2014)

Uso de fructanos como sustituto de grasa en productos alimentarios

Las moléculas de cadena larga de la inulina en presencia de agua son capaces de desarrollar y/o formar geles. Este hecho provoca cambios en la textura del alimento en que sean incorporadas y además mejora la palatabilidad del producto (Tungland y Meyer, 2002; Karimi, Azizi, Ghasemlou, y Vaziri, 2015).

La formación de un gel se basa en la precipitación y cristalización de las moléculas de inulina, las cuales dependen de la concentración, temperatura y pH (Kim, Faqih, y Wang, 2001; Meyer, 2009). A niveles de concentración por encima de 25%, la disolución presenta partículas de gel con características parecidas a la grasa, mientras que por encima del 50%, éstas mantienen una textura similar a las grasas y se convierten en geles con una mayor firmeza (Zimeri y Kokini, 2002). Por tanto, la capacidad de formar gel de la inulina es determinante en su uso como sustituto de grasas en productos lácteos, untables, aderezos, salsas y otros productos en los que las propiedades funcionales que otorgan las grasas son indispensables para lograr los efectos sensoriales deseados por los consumidores.

En la elaboración de yogures a base de leche descremada, imparten una mayor cremosidad, también actúa como agente espesante, retiene el agua y estabiliza geles (Kip, Meyer, y Jellema, 2006; Paseephol Tatdao, Small Darryl M., y Sherkat Frank, 2008; Modzelewska-Kapituła Monika y Kłębukowska Lucyna, 2009). Otros autores mostraron que este efecto también es observable en quesos bajos en grasa (Koca y Metin, 2004; Hennelly, Dunne, O'Sullivan, y O'Riordan, 2006), helados elaborados a base de yogurt (El-Nagar G, Clowes G, Tudorică C M, Kuri V, y Brennan C S, 2002), mousse (chocolate, fruta, yogurt o base de queso fresco) (Franck, 2002; Cardarelli, Buriti, Castro, y Saad, 2008), flanes bajos en grasa y natillas (Tárrega y Costell, 2006; Lobato, Grossmann, y Benassi, 2009).

Por otro lado, en productos horneados, la grasa es un ingrediente importante ya que contribuye a la textura, palatabilidad, sabor y en la percepción general de ellos (Zoulias, Oreopoulou, y Kounalaki, 2002; Zahn *et al.*, 2010). Los lípidos modifican la estructura del gluten lo que contribuye a aumentar el volumen, genera una textura

suave y uniforme de la miga (Rodríguez-García y Hernando, 2014a). En investigaciones previas, Rodríguez-García *et al.* (2012) encontraron que el remplazo de grasa por inulinas hasta un 50% en masa y pastel no presentó diferencias significativas en la mayoría de los parámetros físicos del producto estudiado. Así mismo, Zahn *et al.* (2010) concluyeron que el remplazo hasta un 50% de grasa por inulina es posible en la elaboración de muffins o productos similares sin presentar cambios significativos en textura y propiedades sensoriales. Diversos estudios relacionados con la sustitución parcial de ciertos ingredientes en diferentes productos alimenticios son presentados en la Tabla 2.

Uso de fructanos como sustituto de azúcar en productos alimentarios

Como remplazo de azúcar, las moléculas de cadena corta de la inulina mejoran el dulzor de la sacarosa hasta en un 35%. Así, su uso para remplazar parcialmente el sabor de la molécula de sacarosa ha sido ampliamente estudiado (De Castro, Cunha, Barreto, Amboni, y Prudêncio, 2008; Villegas, Tárrega, Carbonell, y Costell, 2010).

La inulina presenta una mayor solubilidad y mayor capacidad de retención de agua en comparación con la sacarosa, por lo tanto, no se recristaliza de manera que la textura de la miga en panificación se vuelve más blanda (Devereux H.M., Jones G.P., McCormack L., y Hunter W.C., 2006; O'Brien, Mueller, Scannell, y Arendt, 2003; De Castro *et al.*, 2008; Zbikowska y Rutkowska, 2008; Villegas *et al.*, 2010; Zahn *et al.*, 2010; Röble, Ktenioudaki, y Gallagher, 2011; Forker, Zahn, y Rohm, 2012; Rodríguez-García *et al.*, 2012; Laguna Laura, Primo-Martín Cristina, Salvador Ana, y Sanz Teresa, 2013a).

En la elaboración de productos horneados a base de harina de trigo, la adición de inulina en su formulación no afectó las características reológicas de la masa antes del horneado y tampoco en la calidad sensorial del producto terminado (Wang *et al.*, 2002; O'Brien *et al.*, 2003). Sin embargo, éstas producen un aumento de la dureza de la corteza, el volumen y el color de la superficie, debido a su contribución a las reacciones de Maillard

Tabla 2. Aplicaciones de inulina y/o oligofruktanos como sustitutos de grasa y azúcar en productos panificables

PRODUCTO	APLICACIÓN	REFERENCIA
Galleta light	La combinación de Z-trim-sucralosa logró reducir el 33% del valor calórico manteniendo las características fisicoquímicas similares al producto control.	(Valencia García <i>et al.</i> , 2008)
Pan	El remplazo de grasa por inulina hasta un 6% permitió obtener un producto con buena calidad sensorial y una reducción calórica y un aumento en el contenido de fibra dietética.	(Brasil <i>et al.</i> , 2011)
Biscuit	El remplazo de grasa por inulina o hidroxipropil metilcelulosa a una concentración de 15 g/100 g, proporcionó productos aceptables.	(Laguna, Primo-Martín, Varela, Salvador, y Sanz, 2014)
Galletas	El remplazo de grasa por agavinas de <i>Agave angustifolia</i> hasta un 20% permitió obtener características de calidad similares al control. Además, su adición permitió obtener ventajas nutricionales, como bajo aporte calórico, capacidad prebiótica y contribuyó a reducir la ingesta energética del ser humano.	(Santiago-García, Mellado-Mojica, León-Martínez, y López, 2017)

Un análisis realizado a la miga de pan funcionalizado mostró una estructura más uniforme cuando el azúcar y la grasa fueron reemplazados por inulina y oligofruktosa. La oligofruktosa, comercialmente conocida como rafteriosa, también se puede integrar en productos de panadería para reducir el contenido de sacarosa (Gallagher, O'Brien, Scannell, y Arendt, 2003a; Ronda, Gómez, Blanco, y Caballero, 2005; Chanu Handa, Goomer, y Siddhu, 2010; Handa, Goomer, y Siddhu, 2012) o para producir alimentos funcionales (Gallagher, O'Brien, Scannell, y Arendt, 2003b).

El uso de ITF (fructanos tipo inulina) de cadena corta en la elaboración de productos horneados libres de gluten mejoran sus propiedades tecnológicas (Capriles y Arêas, 2013). Diversos autores reportan que el uso de un 4 a 12% de ITF mejora considerablemente el volumen del producto final, el color de la corteza es más oscura y el de la miga se vuelve más atractiva; además, estos productos obtuvieron altos puntajes en aceptabilidad sensorial.

El uso de ITF de cadena larga afecta las propiedades reológicas y viscoelásticas de los productos donde son adicionados. Esto provoca la disminución en la consistencia y la viscosidad de la masa, con un incremento en la temperatura de gelatinización (Juszczak *et al.*, 2012). Por otro lado, productos libres de gluten elaborados con un 20% de inulina y adicionados a la harina de arroz, arrojaron un incremento en el contenido de fibra, una reducción en el contenido de grasa y una mejora en la incorporación de aire durante la mezcla (Gulati, 2012).

Con respecto a la elaboración de chocolates, los ITF han sido empleados como agentes de bajo contenido calórico, en su mayoría en combinación con un poliol. La dulzura de los ITF es relativamente menor que de la sacarosa, de modo que se usan a menudo en combinación con edulcorantes de alta intensidad. Sin embargo, una dosis mayor de ITF puede causar molestias gastrointestinales. Por lo tanto, se recomienda una ingesta de 40-50 g por día para adultos y 30 g para niños (Ghosh y Sudha, 2012). Esta dosis puede reemplazar el contenido de azúcar sin ningún efecto sobre el contenido de grasa (Farzanmehr Hannaneh y Abbasi Soleiman, 2009; Shah Abhishek B., Jones Gwyn P., y Vasiljevic Todor, 2010; Palazzo A.b.,

Carvalho M.a.r., Efraim P., y Bolini H.m.a., 2011). Finalmente, los ITF también han sido adicionados como sustituto de azúcar en la elaboración de barras energéticas (Aragon-Alegro, Alarcon Alegre, Roberta Cardarelli, Chih Chiu, y Isay Saad, 2007) y cereales extruidos (Franck, 2002) con un desempeño similar o incluso mejorado en sabor, color y textura.

Otras aplicaciones de los fructanos

Además de las propiedades tecno-funcionales que los fructanos proporcionan a los alimentos, los ITF también muestran beneficios a la salud, debido a que forman parte de la fibra dietética alimentaria, son fermentables y ayudan a mejorar las funciones intestinales, ya que son compuestos bifidogénicos y prebióticos. Además, este tipo de fructanos mejoran la absorción del calcio; y reducen el nivel de triglicéridos en sangre en individuos con niveles elevados de grasa en sangre.

Por todo ello, los ITF están clasificados como ingredientes alimentarios funcionales (Roberfroid, 2005, 2007). Para asegurar los efectos bifidogénicos, se deben adicionar 3-8 g de inulina por porción de alimento (Meyer *et al.*, 2011). Algunos de los beneficios nutricionales a la salud, conferidos por los ITF se discuten en los siguientes apartados.

Fibra dietética

En la actualidad la dieta de los países desarrollados es deficiente en fibra, lo que conduce a numerosas complicaciones de salud. En nuestros días la fibra dietética es considerada como un ingrediente esencial para mejorar la salud del ser humano, debido a que es impermeable a la hidrólisis por las secreciones intestinales y por las absorciones en el intestino pequeño y es fermentable en el intestino largo por la microbiota del intestino grueso (Wong, de Souza, Kendall, Emam, y Jenkins, 2006; Roberfroid, 2007; Turner y Lupton, 2011).

Debido a lo anterior, el agregar fibra a los productos horneados es beneficioso debido a que aumenta la ingesta de fibra dietética y disminuye la ingesta calórica. Una de las estrategias para llegar a este fin es eliminar de manera parcial o total las grasas (componente que proporciona el mayor número de calorías) y sustituirlo por

otros productos con un bajo aporte calórico como la fibra (Gómez, Ronda, Blanco, Caballero, y Apesteguía, 2003).

En el 2001, la Asociación Estadounidense de Química Clínica, (AACC, por sus siglas en inglés) adoptó la siguiente definición:

“La fibra dietética es la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos, resistentes a la digestión o absorción en el intestino delgado humano, con fermentación parcial o total en el intestino grueso. La fibra dietética incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas de la planta. La fibra dietética promueve efectos fisiológicos beneficiosos, incluyendo laxación y/o disminución de la glucosa en sangre”.

Sin embargo, para el 2002, la Academia Nacional de Ciencias, Ingeniería y Medicina (FNB, por sus siglas en inglés) definió que, la fibra dietética consiste en carbohidratos no digestibles y lignina intrínsecos e intactos en las plantas. Por otro lado, la fibra funcional consiste en carbohidratos no digestibles aislados y lignina que tienen efectos fisiológicos beneficiosos en humanos. La fibra total es la suma de la fibra dietética y la fibra funcional. Estas definiciones nuevas incluyen oligosacáridos, almidón resistente y lignina en la fibra dietética y fibra total. La fibra dietética se puede clasificar como fibra soluble y fibra insoluble.

Las fibras solubles incluyen a las pectinas, parte de las hemicelulosas (tipo A), las gomas, los mucílagos y los poli y oligosacáridos. Cuando la fibra entra en contacto con el agua, ésta se disuelve, y forma geles viscosos en el intestino delgado, dichos geles atrapan el colesterol que se encuentra en el intestino, evitando así que éste pase a la corriente sanguínea. Como consecuencia de su viscosidad, enlentecen el vaciamiento gástrico y aumentan su distensión, prolongando la sensación de saciedad. La fibra aumenta los movimientos peristálticos del intestino, provocando un aumento de la frecuencia de las deposiciones y del volumen de las heces, debido a que al hidratarse aumentan su volumen. Debido a todo ello, la fibra soluble tiene propiedades benéficas, como la capacidad para reducir el estreñimiento y mejorar la flora y tránsito intestinal, equilibrar el nivel de colesterol, prevenir el cáncer de colon y combatir las subidas de glucosa en sangre (Zaragoza, 2016).

La fibra insoluble se compone fundamentalmente de fragmentos de las paredes celulares que contienen celulosa, parte de las hemicelulosas (tipo B) y lignina. Dichas fibras son capaces de retener el agua en su matriz estructural, formando mezclas de baja viscosidad, lo que produce un aumento de la masa fecal y acelera el tránsito intestinal. La fibra insoluble es poco fermentable, por lo cual mantiene su capacidad de retención hídrica, contribuyendo a la regulación de la consistencia y del volumen de las deposiciones emitidas. Entre sus propiedades beneficiosas se encuentra la capacidad de limpieza de las paredes del intestino eliminando los desechos adheridos, el aumento del volumen de las heces, y además contribuye a disminuir la concentración y el tiempo de contacto de potenciales carcinogénicos con la mucosa del colon (Zaragoza, 2016). Un ejemplo significativo del complejo de la fibra dietética y que en estos momentos ya es registrada en la etiqueta de numerosos alimentos es la inulina, la cual, pasa en un 90% al colon y es digerida por las bacterias presentes allí (Cherbut, 2002).

Valor calórico

El contenido calórico bajo de la inulina (1.5 kcal/g o 6.3 kJ/g) es debido a que no es digerible en comparación con el resto de los monosacáridos. Por la acción de las bacterias intestinales, la inulina es transformada en pequeños ácidos grasos de cadenas cortas (acetato, propionato y butirato), lactato, combustible bacteriano y gases (Nyman, 2002). Los ácidos grasos de cadena corta y el lactato pueden aumentar el metabolismo energético del organismo hospedero. Respecto a la evidencia de resultados *in vitro* e *in vivo*, el rango de energía de inulina y oligofructosa ha sido reportado de 1.5 kcal/g (Roberfroid, 1999). Otras investigaciones han observado el uso de una menor cantidad de inulina, donde, el rango va de 1 a 1.5 kcal/g, el cual está siendo usado en el etiquetado de los alimentos (Flamm, Glinsmann, Kritchevsky, Prosky, y Roberfroid, 2001).

Efecto sobre el metabolismo lipídico

La adición de carbohidratos no digeribles como la inulina a la dieta puede disminuir el riesgo de concentraciones altas de triacilglicerol. Letexier, Diraison, y Beylot (2003) concluyeron que la incorporación de inulina de alto rendimiento (1 g/d) en

alimentos ricos en carbohidratos y reducidos en lípidos ejerció un resultado positivo sobre los lípidos plasmáticos de los seres humanos disminuyendo la lipogénesis sanguínea y las concentraciones plasmáticas de triacilglicerol reduciendo la arterosclerosis. Sin embargo, Williams y Jackson (2002) estudiaron los efectos de la suplementación con inulina y oligofruktanos sobre los niveles lipídicos (LDL-colesterol y triacilglicerol) en diez pacientes. Los resultados arrojados de esta investigación mostraron que tres de ellos no mostraron efectos sobre los niveles de colesterol y triacilgliceroles en la sangre, otros tres pacientes presentaron considerables reducciones en los triacilgliceroles, mientras que, se observó un decremento moderado en colesterol LDL en cuatro pacientes. Con los resultados obtenidos en esta investigación se concluye que la suplementación con inulina en la dieta de los hipercolesterolémicos puede mejorar los perfiles lipídicos en sangre (Delzenne, Daubioul, Neyrinck, Lasa, y Taper, 2002).

Efecto bifidogénico

El intestino grueso de los seres humanos está constituido por unas 400 clases de bacterias, las cuales están implicadas en el contenido sólido del colon. La microbiota intestinal de cada individuo es característica y única (Zoetendal, Vaughan, y Vos, 2006). En general, las bacterias del intestino pueden ser clasificadas en tres grupos dependiendo de sus posibles efectos:

- a. *Lactobacilli* y *Bifidobacteria*
- b. Posibles bacterias patógenas como la especie *Clostridia*
- c. Bacterias comensales, tales como *Bacteroides* que poseen características de bacterias Gram positivas y Gram negativas.

No es una certeza, pero se entiende que una microbiota intestinal que contiene *Lactobacilli* y *Bifidobacteria* en grandes cantidades es benéfico para la salud del ser humano (Eckburg *et al.*, 2005; Kamarul Zaman, Chin, Rai, y Majid, 2015). Los fructanos estimulan el desarrollo y acción metabólica de un número limitado de bacterias en el colon, particularmente *Lactobacilli* y *Bifidobacteria*, lo que estaría relacionado con el bienestar del consumidor (Roberfroid, 2000; Karimi *et al.*, 2015).

Los probióticos son definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), como microorganismos vivos que al ser ingeridos en cierta cantidad tienen efectos benéficos en el huésped al mejorar el equilibrio microbiano en el intestino (Food and Agriculture Organization of the United Nations y World Health Organization, 2006).

Los prebióticos son componentes no digeribles fermentadas en el colon por bacterias específicas promotoras de la salud, que permiten cambios específicos en la composición y/o actividad de la microbiota intestinal que confiere efectos benéficos a la salud; nutren a grupos seleccionados de microorganismos que habitan en el intestino y favorecen el crecimiento de bacterias beneficiosas sobre las nocivas (Roberfroid, 2000, 2007; WGO Practice Guideline. Probiotics and prebiotics, 2011; Karimi *et al.*, 2015).

Para que los prebióticos sean considerados eficientes, éstos no deben ser hidrolizados o absorbidos en la parte superior del intestino, debido a que el intestino humano carece de enzimas hidrolíticas capaces de digerir estos enlaces. Por lo tanto, los fructanos alcanzan el colon relativamente intacto, disminuyendo el pH (resultado de la estimulación de los ácidos grasos de cadena corta y lactato). Así, los fructanos modifican la microbiota del intestino grueso, dando lugar a un incremento de la biomasa bacteriana, que a su vez aumenta el contenido de agua fecal y la frecuencia de las heces. Además, los prebióticos deben ser un sustrato selectivo para un número limitado de bacterias potencialmente benéficas del colon, por ejemplo, *Bifidobacteria* y *Lactobacilli*, cuyo crecimiento se estimula. Finalmente, éstos deben ser capaz de alterar la microbiota colónica hacia una población o actividad potencialmente más saludable (Loo y E, 2004; Roberfroid, 2001, 2005b, 2007; Tarini y Wolever, 2010).

La tasa y el alcance de la fermentación de las ITF parecen estar fuertemente influenciados por el grado de polimerización. Los FOS (baja polimerización) se fermentan rápidamente en el colon proximal (Rumessen, Bodé, Hamberg, y Gudmand-Høyer, 1990). Por otro lado, la inulina (alto grado de polimerización) parece tener un perfil de fermentación más continuo que potencialmente permite

efectos protectores en el colon distal (Wiele, Boon, Possemiers, Jacobs, y Verstraete, 2007; Kelly, 2008).

Los prebióticos (fructanos, incluyendo los oligosacáridos solubles del intestino) pueden suprimir el crecimiento de bacterias patógenas, mejorando la salud considerablemente (Roberfroid, 2001). Este efecto es debido a que imitan a los azúcares encontrados en las glucoproteínas y glicolípidos de las células epiteliales, evitando así la adherencia de microorganismos patógenos (Dai, Nanthkumar, Newburg, y Walker, 2000).

Investigaciones actuales indican que las bacterias benéficas reducen el riesgo de enfermedades a través de diversos mecanismos, incluyendo la modificación de la composición o función de la microbiota microbiana y la regulación de las respuestas epitelial e inmunológica del huésped. Estos efectos pueden ser revelados a través de cambios en las poblaciones bacterianas y la actividad bioquímica (Sanders *et al.*, 2013). El metabolismo bacteriano puede conferir una serie de efectos de ventaja en el huésped, incluyendo la producción de vitaminas, la modulación del sistema inmunológico, el aumento de la digestión y la absorción, la inhibición de especies bacterianas dañinas y la eliminación de carcinógenos y otras toxinas (Kolida y Gibson, 2007).

Prevención de enfermedades

El consumo de ITF se ha asociado a la prevención de diversas enfermedades como la mitigación de estreñimiento, supresión de diarreas (especialmente las asociadas a infecciones intestinales), reducción del riesgo de osteoporosis, disminución de riesgo a la arterosclerosis cardiovascular asociada a dislipidemias (especialmente a hipertrigliceridemia y a la resistencia de insulina), reducción de riesgo a la obesidad y a la posibilidad de contraer diabetes tipo 2 (ambas enfermedades asociadas a la resistencia de insulina), síndrome del intestino irritable y cáncer de colon inducido químicamente (Ulloa *et al.*, 2010).

Disponibilidad de minerales

Dentro de los minerales que se absorben de mejor manera en presencia de fructanos, destaca el calcio y magnesio. Lo anterior, tiene una consecuencia benéfica en la salud de los huesos, especialmente en lo relacionado a su mineralización, densidad y reabsorción (Ulloa *et al.*, 2010). García-Vieyra, Del Real, y López (2014) concluyeron que la suplementación con los fructanos del Agave previene la pérdida ósea y mejora su formación.

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN EN PRODUCTOS A BASE DE CEREALES

En el mundo se sufre de distintas formas las deficiencias nutricionales, especialmente en países en desarrollo dónde la diversidad de la dieta es muy limitada (Bodroza-Solarov *et al.*, 2008). Para superar dichas deficiencias y fomentar el consumo de alimentos nutritivos y saludables, se hacen diversas investigaciones, a base de granos enteros o harinas integrales, harinas compuestas o productos con un elevado aporte de fibra dietética (Bodroža-Solarov, Filipčev, Kevrešan, Mandić, y Šimurina, 2008; Sanz Penella, Collar, y Haros, 2008a; Penella, Ramos, Herranz, y Haros, 2008b; Sanz-Penella, Tamayo-Ramos, Sanz, y Haros, 2009; Sanz-Penella, Wronkowska, Soral-Smietana, y Haros, 2013).

Para resolver estos problemas reales y/o de investigación que involucran productos elaborados a partir de la mezcla de distintos ingredientes o componentes y que, dependiendo de las proporciones, estos juegan un papel importante en las características de calidad del producto final. El diseño de experimentos con mezclas permite determinar cuáles ingredientes de la mezcla o interacción entre ellos tiene una mayor influencia sobre las variables de interés y mediante la metodología de la superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) se encuentran las condiciones óptimas de operación de un proceso (Pulido y Salazar, 2008). RSM puede ser aplicado a evaluar el efecto de las variables independientes, solas o combinadas, en los procesos. Además, también genera un modelo matemático que describe la interacción de las variables independientes sobre las variables respuesta (Montgomery, 1984; Myers *et al.*, 2004). En la Tabla 3 se muestran algunos ejemplos en relación a la optimización de productos horneados.

Tabla 3. Optimización de productos a base de cereales

PRODUCTO	VARIABLES OPTIMIZADAS	REFERENCIA
Pan a base de fécula de mandioca y harina de maíz	Grasa, huevo y leche	(Milde, Valle Urbina, Rybak, Oliveira, y González, 2009)
Pan funcionalizado	Harina de trigo y harina de banano verde con cáscara	(Garzón, Acosta, Cardona, Hurtado, y Ro, 2012)
Pan funcionalizado	Harina de trigo, harina de peladilla de espárrago y harina de kiwicha	(Zumarán y Yglesias, 2013)
Pasta	Harina de cacahuete, sémola y fibra de zanahoria	(Badwaik, Prasad, y Seth, 2014)
Pasta	Fibra soluble (goma de guar parcialmente hidrolizada), agua y tiempo de mezclado	(Mudgil, Barak, y Khatkar, 2016a)
Pan	Fibra soluble (goma de guar parcialmente hidrolizada) y agua	(Mudgil, Barak, y Khatkar, 2016b)
Pan de trigo	Beta glucano y agua	(Kurek, Wyrwiesz, y Wierzbicka, 2017)

III. JUSTIFICACIÓN

Los cereales tales como el trigo, cebada y/o centeno se utilizan ampliamente en la elaboración de productos panificables y juegan un rol importante en la dieta diaria en el ser humano, lo cual es debido a su aporte equilibrado de micro y macronutrientes. Sin embargo, en las últimas décadas, la tendencia del consumidor es aumentar la cantidad de fibra dietética y reducir la ingesta de grasa y azúcar en los alimentos. Por esta razón, los alimentos no sólo están enfocados a satisfacer el hambre y proporcionar nutrientes necesarios, sino también en prevenir numerosas enfermedades denominadas “enfermedades de la civilización” tales como la diabetes, obesidad, enfermedades cardiovasculares, celiaquía, entre otras. Lo anterior, nos lleva a buscar nuevas estrategias que nos permitan modificar el perfil nutricional basándonos en el aprovechamiento de otro tipo de cereales como los libres de gluten tales como el sorgo, arroz y amaranto.

En este sentido, los alimentos funcionales ofrecen una excelente oportunidad para mejorar la calidad de los productos. Es por ello que, la industria alimentaria se ve en la necesidad de buscar nuevas alternativas que garanticen a la población el abasto de alimentos con un alto valor nutritivo y bajo contenido calórico. En este contexto, el desarrollo de productos panificables que incorporen en su formulación fructanos (derivados de ciertas especies de planta como el *Agave tequilana* Weber azul) como fibra dietética podrían ser de gran ayuda para la salud de los consumidores, previniendo el estreñimiento, facilitando una buena salud del colón, disminuyendo los niveles de glucosa y colesterol en sangre, entre otros.

Dicho lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del uso de fructanos denominados agavinas como sustituto parcial de grasa y azúcar en productos panificables a base de harinas libres de gluten (sorgo, amaranto y arroz).

IV. HIPÓTESIS

- La mezcla de harinas de sorgo, arroz y amaranto permitirá desarrollar productos panificables libres de gluten con características físicas y sensoriales similares a los productos elaborados con harina integral de trigo.
- El uso de fructanos tipo agavinas permitirá reducir el contenido total de grasa y azúcar en productos panificables libres de gluten.

V. OBJETIVOS

Objetivo General

Optimizar la concentración de fructanos tipo agavinas como sustituto parcial de grasa y azúcar en un producto panificable tipo muffin funcionalizado a base de una harina compuesta libre de gluten (sorgo, arroz y amaranto).

Objetivos Específicos

1. Establecer un diseño de mezclas para la obtención de una harina compuesta (sorgo, arroz y amaranto) libre de gluten empleada en la elaboración de un producto panificable tipo muffin.
2. Evaluar y optimizar los parámetros físicos del producto panificable obtenido de una harina compuesta.
3. Crear un diseño de mezclas empleando agavinas como sustituto parcial de grasa y azúcar en un producto libre de gluten optimizado.
4. Evaluar y optimizar los parámetros físicos del producto panificable funcionalizado libre de gluten, bajo en grasa y azúcar.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 8 muestra la metodología a seguir para evaluar el efecto del uso de fructanos tipo agavinas como sustituto parcial de grasa y azúcar en productos panificables a base de harinas libres de gluten.

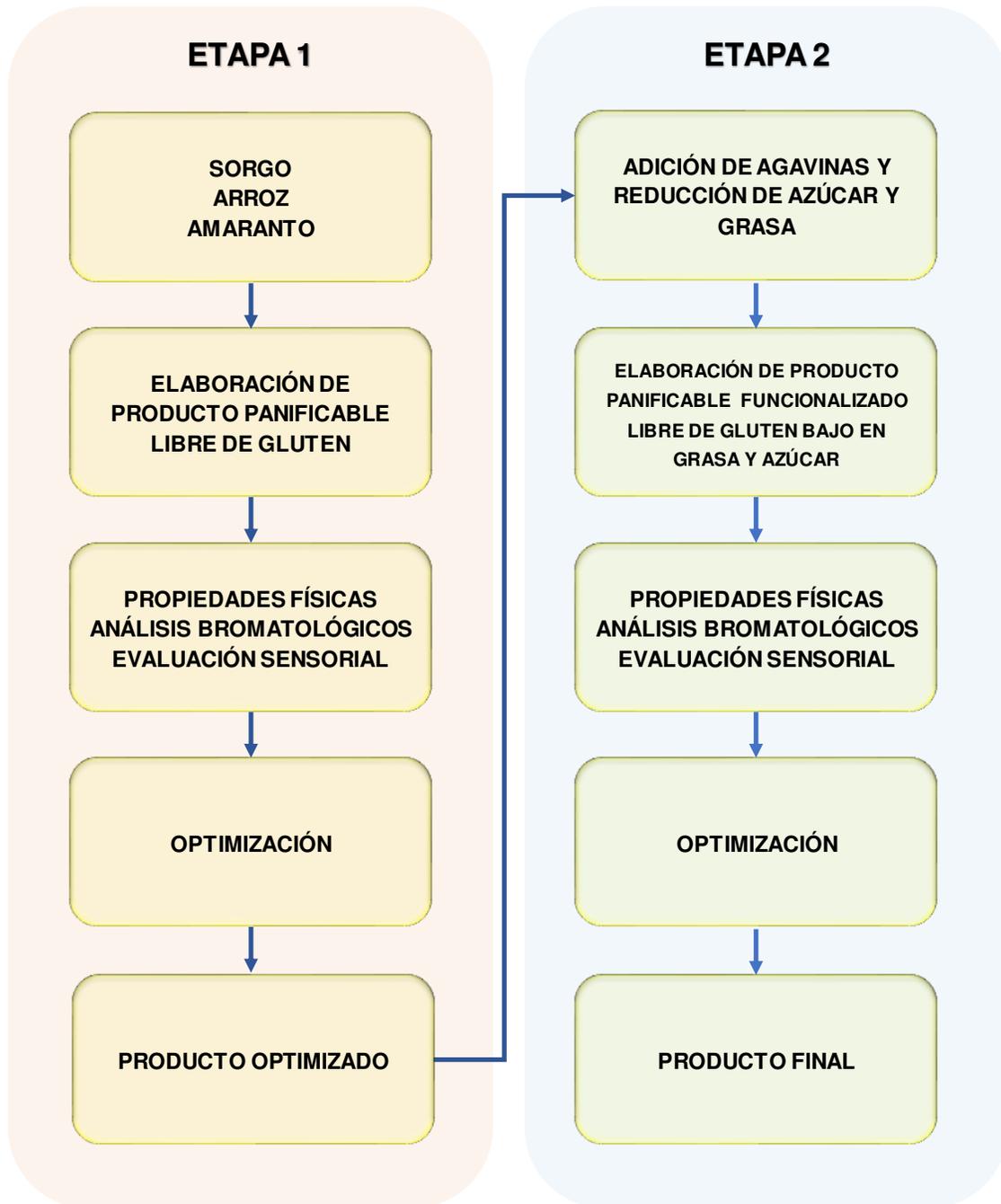


Figura 8. Diagrama de la metodología a seguir en el desarrollo experimental de la investigación.

La presente investigación se llevo a cabo en dos etapas (Figura 8). La Etapa 1 consistió en la obtención de una harina compuesta libre de gluten, a partir de tres cereales (sorgo, arroz y amaranto). Enseguida, la harina compuesta fue sometida a un análisis bromatológico para determinar su contenido en proteína, lípidos, fibra cruda, azúcares, entre otros. Posteriormente, con el uso de esta harina compuesta se elaboró un producto panificable tipo muffin libre de gluten. Para obtener las mejores propiedades físicas, texturales, sensoriales y bromatológicas de este producto panificable, las diferentes proporciones de harina de sorgo, arroz y amaranto se optimizaron a través del uso de un diseño de mezclas, finalmente se obtuvieron los porcentajes óptimos de las harinas libres de gluten para la elaboración del producto sin que afectara sus propiedades físicas y sensoriales.

La Etapa 2 consistió en la elaboración de un producto panificable funcionalizado libre de gluten bajo en grasa y azúcar, para ello, se redujo el contenido de grasa y azúcar y al mismo tiempo se adicionaron fructanos tipo agavinas. De igual manera que en la Etapa 1, las diferentes proporciones de agavinas, grasa y azúcar se optimizaron para obtener las mejores propiedades tecno-funcionales del producto final.

1. Localización

La presente investigación se llevó a cabo en los Laboratorios de Microbiología y de Propiedades Físicas de los Alimentos de la División de Ciencias de la Vida (DICIVA) del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato. Los análisis bromatológicos de las materias primas y de los productos panificables se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Alimentos del Complejo II de la DICIVA.

2. Ingredientes

Los ingredientes empleados en la preparación del producto panificable tipo muffin fueron de origen mexicano. El grano de sorgo fue proporcionado por el Rancho “El Brazo” (Valle de Santiago, Guanajuato). El grano fue limpiado (para eliminar impurezas como piedras, residuos de tierra y glumas) y molido en un molino de nixtamal (Triunfo, Mod. 1000-A, México) para obtener la harina de sorgo. La harina

de amaranto fue adquirida en el Centro de Valor Agregado de Amaranto ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, mientras que la harina de arroz (Tres estrellas®) y la harina de trigo integral (Tres estrellas®) fueron adquiridas en un supermercado de la ciudad de Irapuato, Guanajuato. Las agavinas fueron proporcionadas por la empresa Mieles Campos Azules S.A. de C.V. ubicada en la ciudad de Amatitlán Jalisco. El huevo fresco (Bachoco®), leche entera de vaca (Lala®), azúcar de caña (Zulka®), aceite vegetal (Oléico®), polvos de hornear (Royal®) y extracto de vainilla (Progourmet®) fueron adquiridos en un supermercado en la ciudad de Irapuato.

3. Elaboración del producto panificable tipo muffin

Para la preparación de la masa se emplearon 250 g de harina de trigo integral para el control (Etapa 1) y 250 g de harina compuesta sin gluten (sorgo, arroz y amaranto) para las diferentes condiciones experimentales de las Etapas 1 y 2. En la Etapa 1 se mezcló una cantidad de 150 g de aceite vegetal junto con 125 g de azúcar de caña en una batidora (KitchenAid, Mod. MKA5SSWH, México) durante 6 min a alta velocidad; mientras que para la Etapa 2 se mezcló una cantidad de 64.5 g de aceite vegetal junto con 104 g de azúcar de caña, respetando las condiciones de batido antes mencionadas.

Posteriormente, para ambas etapas, se añadieron 90 g de huevo fresco y se continuó con el batido por 2 min más. Enseguida, se añadieron 100 g de leche entera de vaca con 1 g de extracto de vainilla y se batió por 2 min. En el caso de la Etapa 2, se añadieron los fructanos tipo agavinas (de 1 a 10 g, según fuera el caso) y se continuó con el batido por el tiempo antes mencionado. Los ingredientes secos (250 g de harina y 8 g de polvo de hornear), que previamente fueron pesados y cernidos, se añadieron a la mezcla anterior con un tiempo de batido de 2.5 min más. Una vez obtenida la masa, se llenaron los capacillos con alícuotas de 40.0 ± 0.1 g y se hornearon en un horno eléctrico (Oster, Mod. TSSTTVSKBT, México) a 200°C durante 10 min. Una vez horneados los productos, seis para cada formulación, éstos se dejaron enfriar durante 1 h y posteriormente, se procedió al análisis físico y sensorial.

El análisis proximal de las harinas y los productos horneados se realizó por triplicado siguiendo los métodos estándares de la AOAC (2005): humedad (método 925.09), cenizas (método 923.03), grasa (método 920.39), proteína total (método 960.52) y contenido de fibra total (método 991.43). Los carbohidratos disponibles fueron calculados por diferencia (100% – la suma de todos los componentes).

Determinación de humedad (método 925.09)

Para la determinación de humedad se pesaron 5 g de muestra previamente homogeneizada (m_0) en una cápsula metálica a peso constante (m_1). Se colocó la cápsula con la muestra en la estufa durante 5 h a 105°C. Transcurrido este tiempo, la cápsula con la muestra se sacó de la estufa, se enfrió en un desecador durante 30-45 min y posteriormente se pesó (m_2). La expresión de resultados se calculó empleando la Ecuación 1:

$$\% \text{ humedad} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde m_1 es masa de la cápsula vacía (g), m_0 la masa de la cápsula con la muestra antes del secado (g) y m_2 la masa de la cápsula más la muestra desecada (g).

Determinación de cenizas (método 923.03)

Se pesaron 5 g de muestra homogeneizada (m_0) en una cápsula previamente tarada (m_1). Se pre-calcinó la muestra directamente a la llama de un mechero de Bunsen, evitando que ésta se inflamara. Posteriormente, se colocó en la mufla y se incineró a 550°C hasta obtener cenizas blancas o grisáceas. Transcurrida esta etapa, se pre-enfrió la cápsula con la muestra dentro de la mufla apagada. Finalmente, la cápsula se traspasó a un desecador para terminar de enfriarse. Una vez estabilizado su peso, se pesó a temperatura ambiente (m_2). El porcentaje de cenizas se calculó empleando la Ecuación 2.

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{m_2 - m_1}{m_0 - m_1} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde m_0 es masa de la cápsula con la muestra (g), m_1 la masa de la cápsula vacía (g), m_2 la masa de la cápsula con las cenizas (g).

Determinación de la grasa (método 920.39)

Para la determinación de grasa se pesaron 2 g de muestra homogenizada en el dedal de extracción o papel filtro previamente pesado y tapado con algodón desgrasado (m_0). Previamente, se secó el matraz de extracción por 30 min a $103\pm 2^\circ\text{C}$ y posteriormente se pesó (m_1). El matraz de extracción se colocó en el sistema Soxhlet, el dedal en el tubo de extracción y finalmente se adicionó el solvente al matraz. La extracción de la muestra con el solvente se realizó por 6 a 8 h a una velocidad de condensación de 3-6 gotas/seg. Finalizada la extracción, se eliminó el solvente por evaporación en un rotavapor dentro de una campana de extracción hasta que no se detectara el olor a éter. El matraz con la grasa extraída se colocó en una estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$ por 10 min. Enseguida se enfrió en un desecador y se pesó (m_2). El porcentaje de grasa cruda se calculó empleando la Ecuación 3.

$$\% \text{ grasa cruda} = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde m_0 es el peso de la muestra (g), m_1 es el peso del matraz (g), m_2 es el peso matraz con grasa (g).

Proteína total (método 960.52)

Etapa de digestión

Esta etapa es un tratamiento con ácido sulfúrico concentrado, en presencia de un catalizador y ebullición, el nitrógeno orgánico se convierte en ion amonio. Para llevarlo a cabo, se pesaron de 1 a 5 g de muestra perfectamente molida y se introdujeron en un tubo de digestión. Se añadieron al tubo 3 g de catalizador (mezcla de sales de cobre, óxido de titanio y/o óxido de selenio), 10 mL de H_2SO_4 al 95- 98%. Posteriormente, se digirió a 400°C por 30 min (la digestión ha terminado porque la disolución adquiere un color verde esmeralda característico). Se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente durante 5 min y finalmente, se añadieron 50 mL de agua destilada.

Etapa de destilación

En esta etapa se alcaliniza la muestra digerida previamente y el nitrógeno se desprende en forma de amoniaco. El amoniaco destilado se recoge sobre un exceso desconocido de ácido bórico. Después de la etapa de enfriamiento, se añadieron 25 mL de ácido bórico (matraz elermeyer de 250 mL) y 2 a 3 gotas de indicador. Se colocó en el soporte del destilador y se adicionó una cantidad suficiente de hidróxido sódico 10 N, en cantidad suficiente (~50 mL) para alcalinizar fuertemente el medio y así desplazar el amoniaco de las sales amónicas. El amoniaco liberado es arrastrado por el vapor de agua inyectado en el contenido del tubo durante la destilación y se recoge sobre una disolución de ácido bórico (al 4% p/v).

Etapa de valoración

La cuantificación del nitrógeno amoniacal se realiza por medio de una volumetría ácido-base del ion borato, empleando ácido clorhídrico o sulfúrico y como indicador una disolución alcohólica de una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno. La expresión de resultados se calculó empleando las Ecuaciones 4 y 5.

$$\%N = N \times V \times 14 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\% P = \frac{\text{Nitrógeno}}{m \times 100 \times \text{factor}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde V es el volumen de ácido consumido (mL), N es la normalidad del ácido de valoración (N), m representa la masa de la muestra (g), 14 es el peso atómico del nitrógeno y el factor de conversión es 6.25.

Contenido de fibra dietética (método 991.43)

Se peso 1 g de muestra en un vaso de precipitados de 400 mL (m), enseguida se agregaron 50 mL de buffer fosfato pH 6.0 (ajustar a pH 6.0±0.2, si fuese necesario) y 0.1 mL de la solución de α-amilasa. El matraz se cubrió con papel aluminio y fue colocado en un baño maría durante 15 min a temperatura de 95-100°C con agitación constante. La solución se enfrió y se ajustó a pH a 7.5±0.2 con aproximadamente 10 mL de NaOH (0.275 N). Posteriormente, se adicionaron 5 mg de proteasa y el matraz se incubó por 30 min a 60°C con agitación continua. Se disminuyó la

temperatura y se añadieron 10 mL de HCl 0.325 N. Inmediatamente, se añadieron 0.3 mL amiloglucosidasa, se cubrió el matraz con papel aluminio y se incubó por 30 min a 60°C con agitación continua, enseguida se adicionaron 280 mL de etanol al 95% precalentado a 60 °C. Finalmente, se dejó precipitar a temperatura ambiente por 60 min. Se filtró a vacío en crisol Gooch con cama de celita previamente pesado (P) utilizando etanol al 78%. Se lavó el residuo sucesivamente con tres porciones de 20 mL de etanol al 78%, dos porciones de 10 mL de etanol al 95% y dos porciones de 10 mL de acetona. Se secó el crisol durante toda la noche para facilitar el secado, transcurrido este tiempo, el crisol se enfrió y se pesó (P₁). Finalmente, el residuo del crisol se calcinó a 450°C/5 h, el resultante se enfrió y se peso (P₂). La expresión de resultados se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ FDT} = \frac{\text{masa del residuo} - P - C - B}{\text{masa de la muestra}} \times 100 \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde m es la masa de la muestra (mg), la masa del residuo (mg), P y C son las masas de proteína y ceniza, respectivamente (mg), B es el blanco.

4. Evaluación de las propiedades físicas

A continuación, se presenta la metodología empleada para medir las propiedades físicas y sensoriales de los productos panificables elaborados en esta investigación. Como se ha mencionado anteriormente,

1.1. Peso y altura

Los productos panificables tipo muffin fueron pesados utilizando una balanza electrónica (Velab, VE-5000, México), con una precisión de ±100 mg. La altura fue medida con un vernier electrónico (Control company, Mod. 3418, EUA), con una exactitud de ±0.2 mm; desde la base hasta el punto más alto de la corteza.

Humedad

El contenido de humedad fue determinado por el método estándar de la AOAC, (2005), los resultados se reportaron en gramos de agua por gramos de base húmeda (g H₂O/g B.H.).

Color

Para la industria de alimentos, el color es un parámetro para realizar clasificaciones de productos, evaluación de materias primas, control de procesos y características específicas de ciertos alimentos (Delmoro *et al.*, 2010). Existen dos métodos básicos de medición del color, el sensorial y el instrumental. El modelo de color CIELAB se considera un método instrumental y fue desarrollado por la CIE 1976 y se utiliza ampliamente para describir los colores que puede percibir el ojo humano (International Commission on Illumination, 2004). El modelo $L^*a^*b^*$ determina el color de acuerdo a la posición en el espacio en tres dimensiones (3D) (Noor *et al.*, 2012).

La evaluación de las coordenadas cromáticas del producto panificable se realizó tanto en la corteza como en la miga del producto panificable empleando un colorímetro HunterLab (Reston, ColorFlexEZ, USA). La coordenada L^* corresponde a la luminosidad del color ($L=0$ significa negro, $L=100$ significa blanco), a^* es el croma donde los valores positivos corresponden a rojo y los negativos al color verde, b^* es el tono para este componente los valores positivos corresponden a amarillo y aquellos valores negativos se refieren a azul, a^* y b^* son los dos componentes cromáticos cuyos valores van desde -120 a 120 (León *et al.*, 2006).

Para la medición de las coordenadas cromáticas de la corteza del producto se empleó la parte superior de éste, en el caso de la miga, el producto fue cortado justo por encima del nivel del capacillo e inmediatamente medido. Los resultados fueron expresados de acuerdo con el sistema CIEL $^*a^*b^*$ con referencia a la luminosidad D65 y un ángulo visual de 10°.

Perfil de textura

La textura es un atributo de calidad utilizado en la industria de los alimentos, tanto en frescos como procesados, para evaluar la aceptabilidad y la calidad (Konopacka y Plochanski, 2004). Los factores constituyentes de la textura pueden ser evaluados por análisis descriptivos sensoriales o instrumentales (Costa, 2011; Kim *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2007). En la actualidad, el método instrumental comúnmente utilizado

es el análisis del perfil de textura (TPA), el cual imita las condiciones que se somete el material durante el proceso de masticación (Bourne, 1978; Blair, 1958).

Dentro de los parámetros básicos a determinar en el TPA son la dureza (fuerza necesaria para lograr una deformación determinada), fracturabilidad (fuerza necesaria para fracturar la muestra), adhesividad (trabajo necesario para vencer la fuerza de atracción entre la muestra y una superficie), cohesividad (mide el trabajo realizado en la segunda compresión dividido entre el trabajo de la primera compresión), elasticidad (capacidad que tiene una muestra deformada para recuperar su forma original), gomosidad (fuerza necesaria para desintegrar una muestra de alimento semisólido a un estado tal que permita su ingesta) (Szczeniak, 1963; Bourne, 1978).

El TPA del producto panificable fue medido utilizando un texturómetro (TA-XT2, Stable Microsystem, Reino Unido) empleando una velocidad de 1.2 mm/s, una deformación del 30% con respecto a la altura original (4.5 mm) y 5 s como intervalo entre los 2 ciclos de compresión. Se realizó una prueba de doble compresión con una punta de aluminio de 75 mm de diámetro (P/75). El producto se cortó por encima del nivel del capacillo y la parte superior se descartó para trabajar con la miga del centro (Martínez-Cervera *et al.*, 2012). Una vez obtenido los perfiles de fuerza/deformación a través del texturómetro, se calculó la dureza (kg/ms^2), cohesividad (adimensional), elasticidad (adimensional), masticabilidad (kg) y gomosidad (kg/ms^2) de acuerdo con lo reportado por Hleap y Velasco (2010).

Evaluación sensorial

La evaluación sensorial surge como disciplina para medir la calidad de los alimentos, conocer la opinión y mejorar la aceptación de los productos por parte del consumidor. Además, la evaluación sensorial no solamente se tiene en cuenta para el mejoramiento y optimización de los productos alimenticios existentes, sino también para realizar investigaciones en la elaboración e innovación de nuevos productos, en el aseguramiento de la calidad y para su promoción y venta (marketing) (Hernández, 2005).

La evaluación sensorial de los productos panificables, se llevó a cabo 1 h después del horneado. Se emplearon 50 panelistas no entrenados (con edades comprendidas entre 18 y 40 años) reclutados entre el personal de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato.

Para la realización de la evaluación, los panelistas se sentaron en cabinas individuales y se les proporcionó un vaso de agua purificada para limpiar el paladar entre cada muestra. Las muestras estuvieron conformadas por un control (elaborado a base de harina de trigo integral), un producto panificable libre de gluten (sorgo, arroz y amaranto) y un producto panificable libre de gluten funcionalizado bajo en grasa y azúcar. Los productos fueron evaluados con base a su textura, color, sabor y aceptabilidad. Los atributos ponderados en una escala de cinco puntos: (4) me gusta mucho, (3) me gusta levemente, (2) ni me gusta ni me disgusta, (1) me desagrada levemente, (0) me desagrada mucho.

El orden de presentación de la muestra fue aleatorizado. Los productos consideraron aceptables si sus puntajes promedio para la aceptación general son mayor o igual a 3 (como levemente) (Lebesi y Tzia, 2010)

5. Diseño experimental

En la actualidad para el desarrollo e innovación de nuevos productos se emplean metodologías que permiten obtener resultados óptimos en la formulación y elaboración de productos alimenticios, entre los que destaca el diseño de mezclas. El diseño de mezclas es una metodología de superficie de respuesta, en la que los factores son los componentes o ingredientes de una mezcla. Las variables de respuesta dependen de las proporciones de los ingredientes de la mezcla y no en la cantidad de la mezcla (Pulido y Salazar, 2008).

Etapa 1

Las variables independientes en esta investigación fueron la proporción de harina de sorgo (X_1), harina de arroz (X_2) y harina de amaranto (X_3). El mínimo y el máximo para cada variable independiente se establecieron en 25 y 60% para la harina de sorgo, 15 y 50% para la harina de arroz y 5 y 25% para la harina de amaranto. Estas proporciones fueron basadas en pruebas preliminares y en referencias bibliográficas (Midrula *et al.*, 2007; Surco Almendras y Alvarado Kirigin, 2010; de la Barca *et al.*, 2010; Serrem *et al.*, 2011; Adebowale *et al.*, 2012; Sanz- Penella *et al.*, 2013; Nkhabutlane *et al.* 2014; Casas Moreno *et al.*, 2015; Guzman Urrutia y López Lemus, 2015; Mellado *et al.*, 2016). Las variables de respuesta fueron la altura (Y_1), peso (Y_2), humedad (Y_3), las coordenadas cromáticas de la corteza y la miga del panecillo (Y_4 - Y_9 , respectivamente) y el perfil de textura del producto, es decir, su elasticidad, cohesividad, masticabilidad, gomosidad y dureza (Y_{10} - Y_{14} , respectivamente).

Etapa 2

Las variables independientes optimizadas fueron la proporción de azúcar (X_1), grasa (X_2) y agavinas (X_3). El mínimo y el máximo para cada variable independiente se establecieron en 50 y 59% para el azúcar, 40 y 49% para la grasa y 1 y 10% para las agavinas, respectivamente, basado en pruebas preliminares y en referencias bibliográficas (O'Brien *et al.*, 2003; Akesowan, 2009; Kaling y Mishra, 2009; Zahn *et al.*, 2010; Celik *et al.*, 2013, Laguna *et al.*, 2014;

Rodríguez-García *et al.*, 2014b; Zamora-Gasga *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2016). Las variables de respuesta evaluadas fueron las mismas descritas en la Etapa 1.

Optimización

Mediante el procedimiento de optimización numérica del software (Design-Expert 7.0, Stat-Ease Inc.) se obtuvo la respuesta de optimización para las diferentes etapas experimentales de la presente investigación. Dicho procedimiento es una técnica matemática que sirve para extraer información sobre el punto óptimo que tiene el modelo ajustado (Pulido y Salazar, 2008). Se seleccionó el objetivo deseado para cada variable dependiente, de acuerdo a los valores obtenidos por la condición del control (producto panificable a base de harina de trigo integral). Para la optimización numérica, las variables independientes se mantuvieron dentro de su rango, mientras que las variables respuesta se optimizaron al máximo o dentro de su objetivo, según sea el caso. Para encontrar una solución, los objetivos se combinan en una función compuesta global $D(x)$, llamada función de deseabilidad (Ecuación (7)), donde d_1 a d_n son las respuestas y “ n ” es el número total de respuestas medidas (Myers *et al.*, 2004).

$$D(x) = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} \quad \text{Ecuación (7)}$$

La optimización numérica determina el punto que mejora la función de deseabilidad para maximizar o minimizar. Los gráficos de superficie de respuesta se generaron con este mismo software y se obtuvieron a partir de datos experimentales que mostraron el efecto de la variable independiente en la respuesta (variable respuesta).

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Etapa 1

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para dar cumplimiento a la primera etapa de esta investigación, la cual tuvo como objetivo desarrollar un producto panificable tipo muffin libre de gluten con características físicas similares a las de un producto elaborado a base de harina integral de trigo.

7.1 Caracterización de las harinas (trigo integral y libres de gluten)

La composición química de las harinas estudiadas se presenta en la Tabla 4. La harina compuesta (sorgo, arroz y amaranto) y la harina control (trigo integral) presentaron altos porcentajes de carbohidratos.

Tabla 4. Análisis químico proximal de las harinas libres de gluten y harina de trigo integral

	HARINA DE TRIGO INTEGRAL (1)	HARINA DE SORGO (2)	HARINA DE ARROZ (3)	HARINA DE AMARANTO (4)
PROTEÍNA (%)	14.01±0.12	6.85±0.10	7.14±0.08	17.14±0.12
GRASA (%)	1.58±0.05	3.13±0.01	1.43±0.01	8.02±0.05
FIBRA CRUDA (%)	1.21±0.03	4.00±0.03	0.68±0.02	2.21±0.02
HUMEDAD (%)	9.01±0.05	9.18±0.03	10.45±0.03	5.51±0.02
CENIZA (%)	1.40±0.01	0.99±0.03	0.72±0.02	3.61±0.05
CARBOHIDRATOS (%)	73.98±0.15	79.83±0.13	80.25±0.15	65.71±0.16

1) *Triticum aestivum* 2) *Sorghum vulgare*, 3) *Oryza sativa*, 4) *Amaranthus hypochondriacus*

Principalmente, la harina de amaranto mostró tener altos porcentajes de proteínas (17.14±0.12%) en comparación con las demás harinas estudiadas, incluyendo la harina de trigo integral (14.01±0.12%). Por tanto, el uso de altos porcentajes de amaranto en la harina compuesta podría aumentar los niveles de proteína en la elaboración de productos panificables libres de gluten. Rastogi y Shukla, (2013) reportaron que el grano de amaranto representa una fuente importante de proteína,

pero su importancia no radica solo en la cantidad, sino también en la calidad de la proteína que posee ya que esta cuenta con un excelente balance de aminoácidos (ante todo los esenciales). Por otro lado, los resultados obtenidos en esta investigación mostraron que la harina de amaranto posee altos porcentajes de grasa en comparación con las otras harinas estudiadas ($8.02 \pm 0.05\%$).

El sorgo presentó el mayor contenido de fibra cruda ($4.00 \pm 0.03\%$), seguida del amaranto, lo que significa que posee un alto contenido de α y β -glucanos, celulosa, hemicelulosa, pectinas y lignina (Almendras *et al.*, 2010). Los porcentajes reportados en esta investigación son similares a los obtenidos por otros autores. Abdelghafor y Mustafa (2011) muestran que el contenido de carbohidratos, grasa y humedad del sorgo fueron de 76.36%, 2.87% y 8.16%, respectivamente. Rai *et al.* (2014) reportan valores cercanos en humedad (12.4% y 12.5%,) y carbohidratos (72.2% y 78.5%) para sorgo y arroz, respectivamente. Finalmente, Chauhan *et al.* (2016), obtuvieron valores de proteína, fibra cruda, grasa, humedad y ceniza de 15.05%, 3.0%, 6.68%, 8.13% y 2.93%, respectivamente, para la harina de amaranto.

7.2 Diagnóstico del modelo

7.2.1 Interacción de harinas libres de gluten

Para el desarrollo del producto panificable tipo muffin se realizaron un total de 18 experimentos con diferentes proporciones de harina de sorgo, arroz y amaranto (Tabla 5). La realización de los experimentos se llevó a cabo en orden aleatorio y se evaluaron por sextuplicado.

Los datos experimentales obtenidos se analizaron utilizando un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) y modelos de regresión empleando el software Design-Expert 7.0. Los modelos polinomiales de segundo y tercer orden (Ecuación 8 y 9, respectivamente) se ajustaron a los datos para obtener las ecuaciones de regresión.

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum \sum_{i < j}^p \beta_{ij} X_i X_j \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum \sum_{i<j}^p \beta_{ij} X_i X_j + \sum \sum_{i<j}^p \sum \beta_{ijk} X_i X_j X_k \quad \text{Ecuación (9)}$$

Los coeficientes del polinomio se representaron por β_i (respuesta esperada), $\sum_{i<j}^p \beta_i X_i$ (mezcla lineal), $\sum_{i<j}^p \beta_{ij} X_i X_j$, (mezcla cuadrática) y $\sum_{i<j}^p \beta_{ijk} X_i X_j X_k$ (mezcla cúbica) (Montgomery, 1984). Los términos del modelo se analizaron para determinar su significancia estadística ($p < 0.05$) a través del análisis del modelo, prueba de bondad de ajuste y coeficiente de determinación (R^2) (Weng *et al.*, 2001).

Tabla 5. Diseño de experimentos para la elaboración del producto panificable tipo muffin elaborado a base de harinas libres de gluten.

FORMULACIÓN	SORGO (%)	ARROZ (%)	AMARANTO (%)
1	36.77	50.00	13.23
2	50.08	44.92	5.00
3	40.45	34.55	25.00
4	25.02	49.98	25.00
5	60.00	15.01	24.99
6	60.00	27.54	12.46
7	49.92	32.98	17.10
8	51.35	23.65	25.00
9	34.12	43.58	22.30
10	42.90	41.26	15.83
11	58.38	22.11	19.50
12	46.83	36.83	16.33
13	46.83	36.83	16.33
14	50.08	44.92	5.00
15	25.02	49.98	25.00
16	60.00	15.01	24.99
17	36.77	50.00	13.23
18	60.00	27.54	12.46

De las dieciocho variables de respuesta estudiadas en este trabajo, solo cuatro variables (altura, humedad, luminosidad de la miga y dureza de la miga) se vieron afectadas significativamente ($p < 0.05$) por la variabilidad en la proporción de harina de sorgo, arroz y amaranto. Los modelos polinomiales que describen el comportamiento de estas variables, así como el ANOVA realizado en los modelos, se resume en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de regresión de los modelos de segundo y tercer orden para las variables de respuesta analizadas. Donde A (harina de sorgo, %), B (harina de arroz, %) y C (harina de amaranto, %).

COEFICIENTE DE REGRESIÓN	ALTURA (cm)	HUMEDAD (g H₂O/g B.H)	LUMINOSIDAD DE CORTEZA	DUREZA (kg/ms²)
*A	+3.25	+0.17	+50.93	+1.23
*B	+3.16	+0.21	+44.31	+1.79
*C	+2.99	+0.16	+102.33	+0.54
*A*B	-0.18	+0.23	+2.01	-0.65
*A*C	+1.62	+0.22	-92.89	-0.49
*B*C	+1.08	-0.017	-136.48	+6.38
*A*B*C			+140.52	-6.83
*A*B (A-B)			+1.82	+1.34
*A*C (A-C)			+41.82	+4.72
*B*C (B-C)			+156.45	-14.54
ANOVA				
Modelo				
(P-valor)	0.002	0.042	0.041	0.019
Prueba de bondad de ajuste (P-valor)	0.968	0.586	0.249	0.234
R ²	0.750	0.578	0.803	0.843

7.2.2 Efecto de las variables independientes sobre la altura del producto

La Figura 7 muestra el efecto de los niveles de las harinas libres de gluten en la altura del producto panificable tipo muffin. La altura del producto varió de 3.10 ± 0.27 cm a 3.60 ± 0.16 cm en comparación con el control (4.82 ± 0.22 cm), elaborado a base de harina de trigo integral.

En general, a mayores porcentajes de harina de arroz y menores de harina de sorgo y amaranto dieron como resultado muffins con una mayor altura. El producto con mayor altura fue el que estuvo elaborado con 50%, 37%, y 13% de harina de arroz, sorgo y amaranto, respectivamente. Por el contrario, el producto con menor altura fue aquel que se elaboró con 60% de harina de sorgo, 25% de harina de amaranto y 15% de arroz.

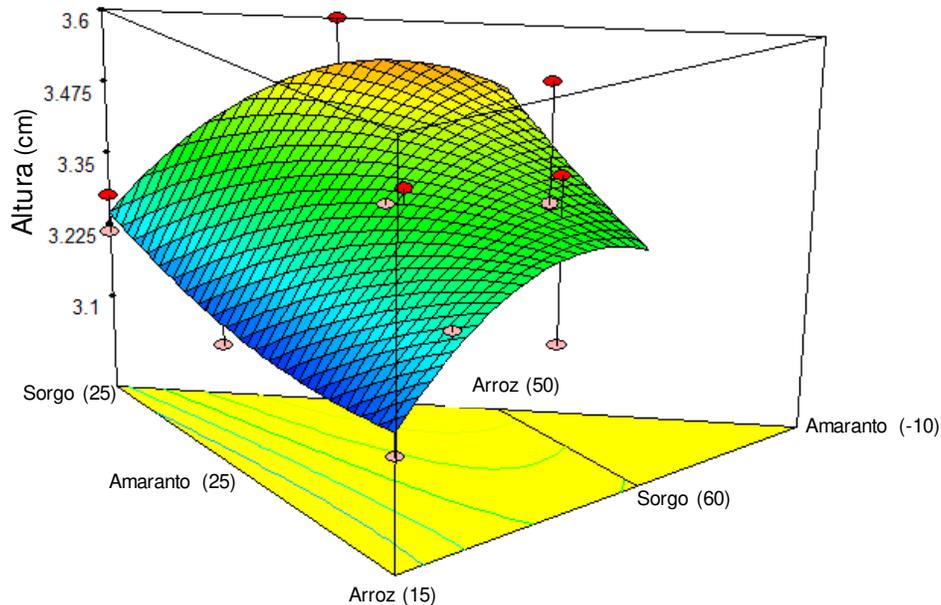


Figura 9. Efecto de interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la altura del producto panificable tipo muffin.

Esta tendencia observada en esta investigación podría atribuirse a que la harina de sorgo y amaranto empleadas poseen un alto contenido de fibra (Tabla 4), la cual está estrechamente relacionado con la disminución de la altura y volumen de los productos de panadería (Peressini y Sensidoni, 2009). Sanz-Penella *et al.* (2013)

reemplazaron la harina de trigo integral por harina de amaranto (hasta 40 g/100 g) en la elaboración de pan. Estos autores reportaron que esta sustitución provocó una disminución significativa ($p < 0.05$) en el volumen final del producto. Del mismo modo, Abdelghafor y Mustafa, (2011) reportaron una disminución significativa en el volumen ($p < 0.001$) de un pan de molde al sustituir entre un 10% y 20% la harina de trigo integral por harina de sorgo integral.

7.2.3 Efecto de las variables independientes sobre la humedad del producto

La Figura 10 muestra el efecto de los niveles de las harinas libres de gluten sobre la humedad final del producto panificable tipo muffin. La humedad del producto varió de 0.15 ± 0.02 a 0.25 ± 0.01 g de agua/g de base húmeda (g H₂O/g B.H.), mientras que la humedad del producto elaborado con harina integral de trigo (control) fue de 0.16 ± 0.01 g H₂O/g B.H.

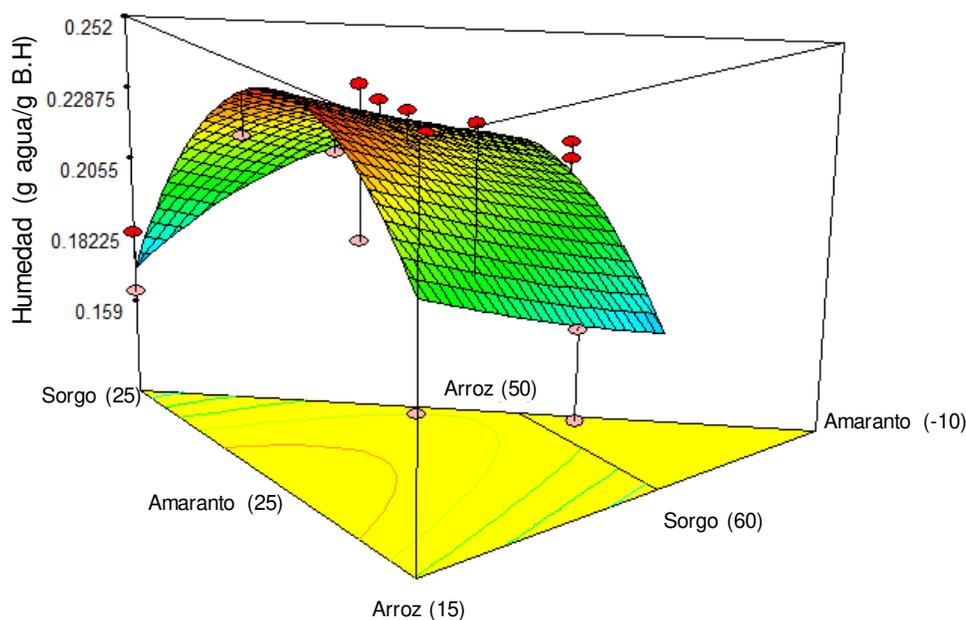


Figura 10. Efecto de interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la humedad del producto panificable tipo muffin.

En general, al emplear mayores proporciones de harina de sorgo y menor de harina de arroz y de amaranto dieron como resultado productos con humedades más bajas (secos). El producto final más seco contenía harina compuesta por 60%, 27% y 12% de harina de sorgo, arroz y amaranto, respectivamente. Por otro lado, los muffins

con una mayor humedad fueron los elaborados con un mayor porcentaje de harina de arroz y bajos porcentajes de harina de sorgo y amaranto (50, 36 y 13%, respectivamente).

De igual forma que en la variable altura, la disminución de humedad en los productos podría atribuirse a que la harina de sorgo y amaranto poseen altas cantidades de fibra (Tabla 4). En este sentido, se ha reportado que los productos de panadería ricos en fibra tienden a ser más secos que los productos de panadería elaborados con harina refinada (Sanz-Penella *et al.*,2013).

7.2.4 Efecto de las variables independientes sobre la luminosidad de la miga del producto

La Figura 11 muestra el efecto de los niveles de las harinas libres de gluten sobre la luminosidad del producto panificable tipo muffin.

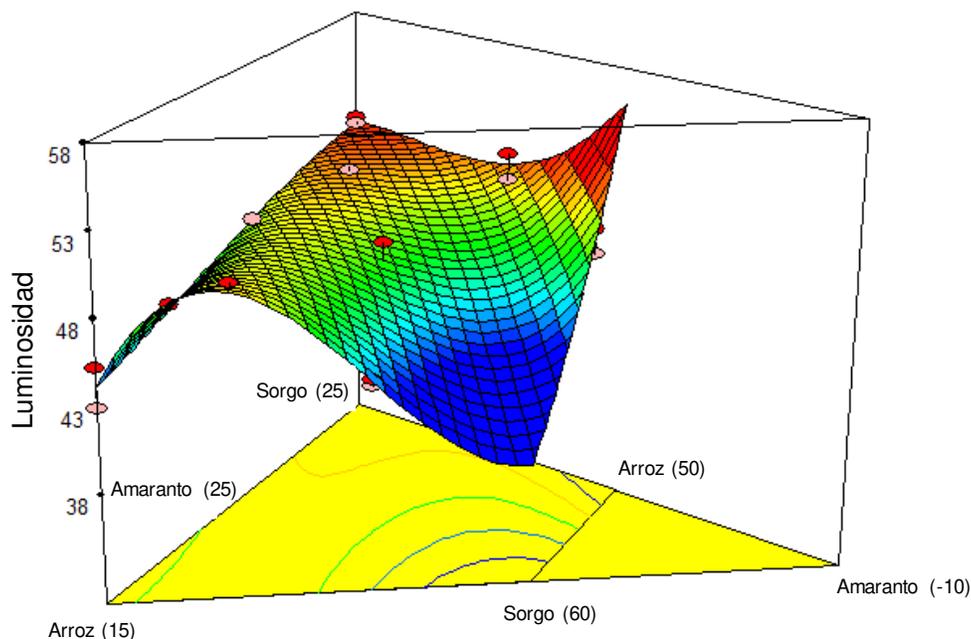


Figura 11. Efecto de interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la luminosidad de la miga del producto panificable libre tipo muffin.

La luminosidad de la miga del producto libre de gluten varió de 51.18 ± 0.69 a 43.09 ± 0.52 , mientras que la miga del muffin elaborado con harina integral de trigo (control) fue superior, 59.62 ± 0.51 . Este hecho indica que los productos libres de

gluten poseen una miga más oscura respecto al control. Casas Moreno *et al.* (2015), a través de un análisis sensorial del color, encontraron que los productos panificables tipo magdalenas elaborados con harina de sorgo eran significativamente ($p \leq 0.05$) más oscuros que aquellos elaborados con harina de trigo. En nuestra investigación, los mayores porcentajes de harina de arroz y menores de harina de sorgo y amaranto dieron como resultado una miga del producto más clara (50%, 37% y 13%, respectivamente).

Por otro lado, porcentajes más altos de harina de sorgo y amaranto y bajos en arroz dieron como resultado una miga más oscura. El producto con la miga más oscura fue aquel que se elaboró con una harina compuesta de 60%, 25% y 15% de harina de sorgo, amaranto y arroz, respectivamente. El uso de harina de granos enteros de sorgo, cuyo pericarpio contiene taninos y antocianinas, puede dar lugar a productos de panadería más oscuro. Este efecto ha sido reportado por diversos autores cuando comparan estos productos con aquellos elaborados a base harina de trigo o harinas comerciales refinadas (Abdelghafor y Mustafa, 2011; Nkhabutlane *et al.*, 2014; Casas Moreno *et al.*, 2015).

7.2.5 Efecto de las variables independientes sobre la dureza del producto

La Figura 10 muestra el efecto de los niveles de las harinas libres de gluten en la dureza de la miga del producto. La dureza de los muffins varió de 1.06 ± 0.16 a 1.92 ± 0.49 kg/ms², mientras que el control de trigo integral estuvo en 1.54 ± 0.10 kg/ms². En general, los porcentajes más altos de harina de sorgo y los más bajos de harina de arroz y de amaranto dieron como resultado una miga más suave. El producto con la miga más suave fue aquel que fue elaborado con un 50% de harina de sorgo y un 33% y 17% de harina de arroz y amaranto, respectivamente.

Diversas investigaciones han reportado que productos de panadería libres de gluten elaborados a base de harina de arroz pueden presentar una mayor dureza de la miga en comparación con los elaborados a base de harina de trigo. Este hecho ha sido atribuido a su alto contenido en carbohidratos y a la falta de gluten en su composición (Matos y Rosell, 2011; Mellado *et al.*, 2016). Sin embargo, la inclusión de harina de sorgo y amaranto en la mezcla de harina libre de gluten puede dar

como resultado productos de panadería más suaves (Midrula *et al.*, 2007; de la Barca *et al.*, 2010).

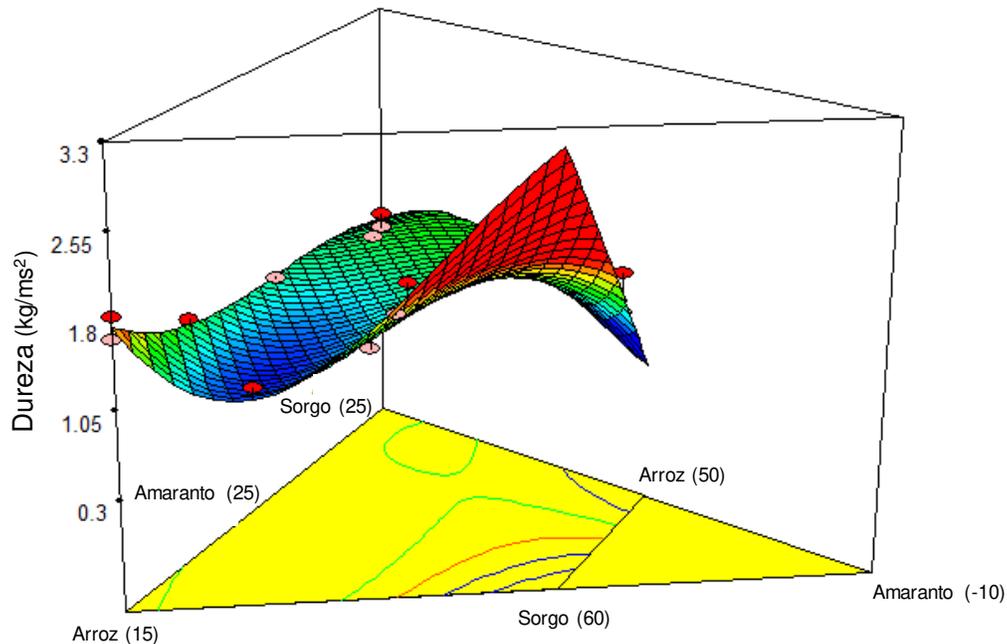


Figura 12. Efecto de la interacción entre las diferentes harinas libres de gluten sobre la dureza del producto panificable tipo muffin.

7.2.6 Optimización de las variables

La optimización numérica de las variables de procesamiento se obtuvo después de asignar ciertas restricciones a la variable respuesta (altura: 4.82 ± 0.22 cm, humedad: 0.16 ± 0.01 g H₂O/g B.H, dureza: 1.54 ± 0.10 kg/ms² y luminosidad de la miga: 59.62 ± 0.51).

La optimización de los porcentajes o niveles de harinas libres de gluten, realizada con el software Design Expert 7.0, arrojó que los valores óptimos de los porcentajes de harinas libres fueron de 50%, 39% y 11% para la harina de arroz, sorgo y amaranto, respectivamente. El valor de la variable de respuesta del producto control y el optimizado se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Optimización numérica de la harina libre de gluten vs control

	OBJETIVO	LÍMITES BAJOS	LÍMITES ALTOS	ÓPTIMO
Altura (cm)	Maximizado	3.12	4.82	3.53
Humedad (g H₂O/g B.H)	En objetivo	0.15	0.24	0.22
L* miga	Maximizado	51	59	51.10
Dureza	Maximizado	1.06	1.54	1.33

7.3 Verificación del modelo

Para verificar la predicción de los modelos, se llevó a cabo una prueba de confirmación utilizando los valores óptimos de cada una de las variables independientes pronosticadas por los modelos contra los valores reales obtenidos del producto panificable optimizado.

Los valores reales (altura: 3.46 ± 0.05 cm, humedad: 0.23 ± 0.01 g H₂O/g BH, luminosidad de la miga: 49.54 ± 1.00) fueron ligeramente más bajos que los valores predichos por el modelo (altura: 3.53 cm, humedad: 0.22 g H₂O/g BH y luminosidad de la miga: 51.10), excepto que la dureza de la miga fue ligeramente más alta (1.18 ± 0.15 kg/ms²) que el valor predicho (1.10 kg/ms²). Sin embargo, tanto los valores predichos como los reales son muy similares. Por lo tanto, la prueba de confirmación validó los resultados experimentales contra los modelos de regresión.

7.4 Caracterización del producto control y del producto optimizado libre de gluten

Los valores de las variables de respuesta para el producto optimizado libre de gluten y el control (harina de trigo integral) se resumen en la Tabla 8. El producto optimizado mostró un mayor contenido de humedad (0.23 ± 0.01 g H₂O/g BH) que el producto control elaborado a base de harina de trigo integral (0.16 ± 0.01 g H₂O/g BH).

Tabla 8. Valores de las variables de respuesta del producto control (harina de trigo integral) y del producto optimizado elaborado con harinas libres de gluten.

	CONTROL	OPTIMIZADO
Altura (cm)	4.82±0.08	3.46±0.05
Peso (g)	36.26±0.42	36.95±0.61
Humedad (g H₂O/g BH)	0.16±0.01	0.23±0.01
L* (corteza)	61.06±1.42	46.43±1.76
a*	11.06±1.35	17.65±1.07
b*	33.56±3.14	37.77±1.16
L* (miga)	59.62±0.51	49.54±1.00
a*	7.89±0.10	7.25±0.15
b*	29.61±0.28	28.48±0.28
Dureza (kg/ms²)	1.54±0.09	1.18±0.15
Elasticidad	0.78±0.02	0.70±0.04
Cohesividad	0.51±0.01	0.51±0.04
Masticabilidad (kg)	0.62±0.04	0.47±0.08
Gomosidad (kg/ms²)	0.79±0.05	0.67±0.14

Por otro lado, el producto optimizado también produjo una miga más suave que el control (valores de dureza de la miga de 1.18±0.15 kg/ms² y 1.54±1.09 kg/ms², respectivamente). En este sentido, se ha reportado que en un muffin el alto contenido de humedad y la suavidad en la miga, son características deseadas (Bartolozzo *et al.*, 2016).

En términos generales, el producto optimizado también fue más oscuro que el control, tanto en la corteza (valores de L* de 46.43±1.76 y 61.06±0.42 para el producto optimizado y de control, respectivamente) como la miga (49.54±1.00 y 59.62±0.51, respectivamente). En diversos países, los consumidores asocian el color oscuro del pan con los beneficios para la salud, ya que es común en panes a

base de centeno, panes elaborados con cereales integrales “pumpernickel” o muffins preparados con salvado oscuro encontrar altos contenidos de fibra los cuales están asociados con efectos benéficos al consumidor (Casas Moreno *et al.*, 2015).

Como se muestra en la Figura 13, el producto control (a) mostró mayor altura que el producto optimizado elaborado con la harina compuesta libre de gluten (b). Sin embargo, los productos elaborados con un 100% de harina de sorgo (c), arroz (d), y amaranto (e) mostraron una menor altura que el producto optimizado. Por otro lado, respecto a la formación de corteza y diferencia de color, el producto optimizado (b) es visualmente muy similar al control (a).

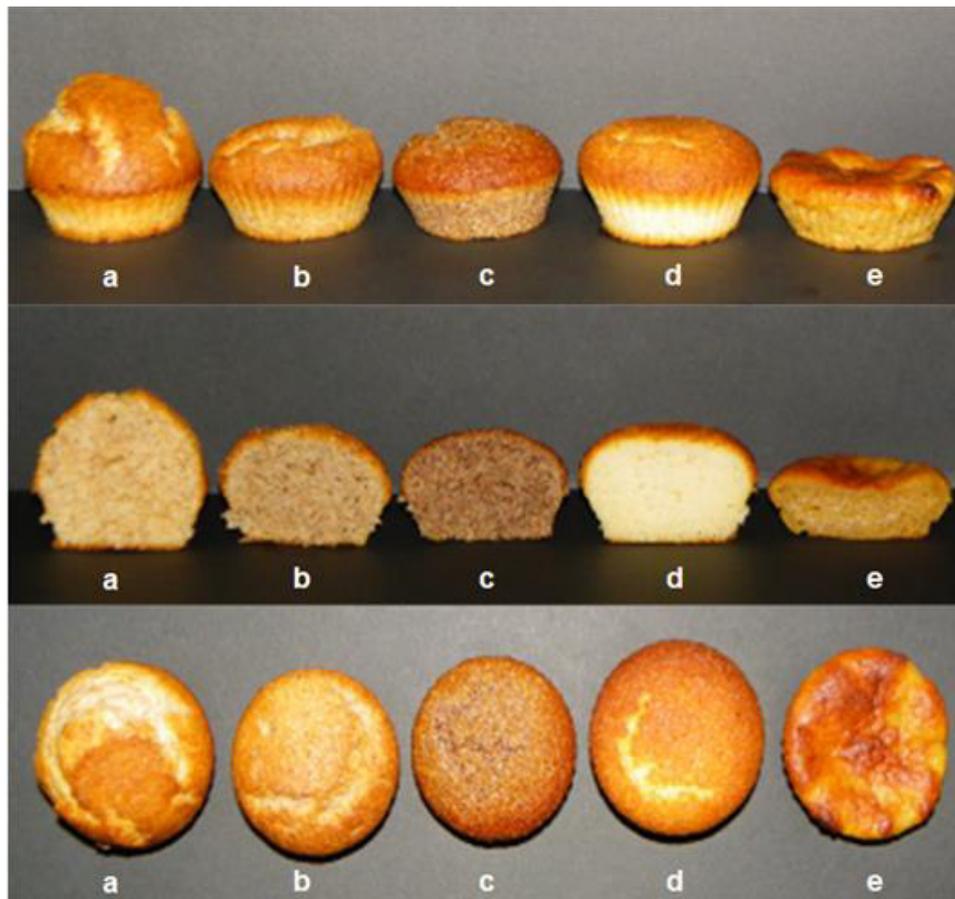


Figura 13. Las imágenes de (a) control harina de trigo integral, (b) el producto optimizado hecho con harina compuesta y los productos finales en los cuales el 100% de la harina de trigo integral se sustituyó por (c) harina de sorgo, (d) harina de arroz, y (e) harina de amaranto.

Por otro lado, el análisis proximal de los productos finales mostró que la composición química del producto optimizado elaborado con harina compuesta era muy similar a la del control, con diferencias de composición menores al 2% (Tabla 9). Adebowale *et al.* (2012) reportaron que las galletas elaboradas con hasta un 10% de harina de sorgo y un 90% de harina de trigo, mostraron un mayor contenido en proteína, grasa, ceniza y fibra cruda (11.84, 4.57, 2.36 y 1.95%, respectivamente), en comparación con resto de las formulaciones estudiadas (5:95, 15:85 y 20:80, sorgo: trigo)

Tabla 9. Análisis químico proximal del producto final optimizado (harina compuesta libre de gluten) y el control (harina de trigo integral).

	CONTROL	OPTIMIZADO
PROTEÍNA (%)	8.29±0.06	6.64±0.04
GRASA (%)	26.44±0.17	27.38±0.05
FIBRA CRUDA (%)	0.40±0.02	0.35±0.01
HUMEDAD (%)	11.68±0.03	10.90±0.04
CENIZA (%)	1.56±0.03	1.33±0.03
CARBOHIDRATOS (%)	52.30±0.18	53.71±0.06

La Figura 14 muestra los resultados de la evaluación sensorial realizada al producto panificable optimizado frente al producto control. Para el color y el sabor, los panelistas no encontraron diferencias significativas ($p>0.05$) entre el producto optimizado y el control. Sin embargo, en la aceptabilidad general y la textura, pese a que el producto optimizado obtuvo calificaciones ligeramente más bajas que el control, ambos productos tuvieron una evaluación general positiva (Figura 14).

Midrula *et al.* (2007) reportaron que los panes elaborados con harina de sorgo al 10% y un 5% de harina de soya desgrasada tuvieron una buena aceptabilidad por parte de los panelistas. Por otro lado, Rai *et al.* (2014) obtuvieron una buena

aceptabilidad en las galletas preparadas con harina de sorgo y mijo perlado en comparación con el control (harina de trigo). Finalmente, Chauhan *et al.* (2016) indicaron que las galletas elaboradas hasta con un 60% de harina de amaranto presentaron los mejores atributos sensoriales, mostrando una buena aceptabilidad por parte de los panelistas.

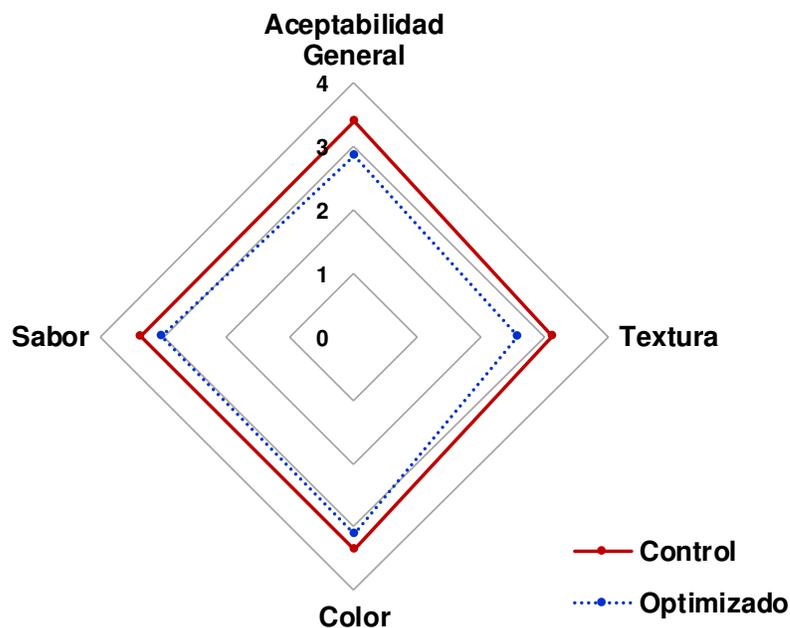


Figura 14. Atributos sensoriales del producto panificable control (harina de trigo integral) y el optimizado (harinas libres de gluten)

Con base en los resultados obtenidos en esta primera etapa de la investigación, la Metodología de Superficie de Respuesta se utilizó con éxito para la optimización de los niveles de harina sin gluten (sorgo, arroz y amaranto) para la preparación de un pan dulce sin gluten tipo muffin. Los cambios en la proporción de harinas de sorgo, arroz y amaranto en la formulación del pan tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la altura, la humedad, el color y la dureza del producto. Sin embargo, al conocer los porcentajes óptimos de harinas libres de gluten (sorgo, arroz y amaranto), es posible sustituir la harina de trigo integral en la preparación de productos panificables con el menor impacto en las propiedades físicas y

sensoriales. Por lo tanto, para la realización de la siguiente etapa de esta investigación se trabajará con un producto panificable tipo muffin elaborado con una harina compuesta preparada con un 50% de harina de arroz y un 39% y 11% para sorgo y amaranto, respectivamente.

2. ETAPA 2

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para dar cumplimiento a la segunda etapa de esta investigación, la cual tuvo como objetivo desarrollar un producto panificable tipo muffin libre de gluten, bajo en grasa y azúcar a través del uso de fructanos tipo agavinas y con características físicas similares a las del producto obtenido de la optimización realizada durante la Etapa 1.

7.5 Diagnóstico del modelo

7.5.1 Interacción de harinas

Se realizaron un total de 16 experimentos con diferentes proporciones de azúcar, grasa y agavinas (Tabla 10). Cada uno de los experimentos se llevó a cabo en orden aleatorio y se evaluó por sextuplicado. Los datos experimentales obtenidos se analizaron utilizando un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) y modelos de regresión utilizando el software Design-Expert 7.0. Los modelos polinomiales de tercer orden (Ecuación 10) se ajustaron a los datos experimentales para obtener las ecuaciones de regresión.

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i < j}^p \sum_{i < j < k} \beta_{ijk} X_i X_j X_k \quad \text{Ecuación 10}$$

Los coeficientes del polinomio se representaron por β_i (respuesta esperada), $\sum_{i < j}^p \beta_i X_i$ (mezcla lineal), $\sum_{i < j}^p \beta_{ij} X_i X_j$ (mezcla cuadrática) y $\sum_{i < j}^p \beta_{ijk} X_i X_j X_k$ (mezcla cúbica) (Montgomery, 1984). Los términos del modelo se analizaron para determinar su significancia estadística ($p < 0.05$) a través del análisis del modelo, prueba de bondad de ajuste y coeficiente de determinación (R^2) (Weng *et al.*, 2001).

Tabla 10. Diseño experimental para el uso de agavinas como remplazo de grasa y azúcar en productos panificables tipo muffin libres de gluten.

FORMULACIÓN	AZÚCAR (%)	GRASA (%)	AGAVINAS (%)
1	54.5	44.5	1
2	50	40	10
3	59	40	1
4	50	49	1
5	54.5	40	5.5
6	50	44.5	5.5
7	56	41.5	2.5
8	51.5	41.5	7
9	51.5	46	2.5
10	53	43	4
11	53.75	43.75	2.5
12	53	43	4
13	53	43	4
14	53	43	4
15	50	40	10
16	59	40	1

De las dieciséis variables de respuesta estudiadas en este trabajo, sólo dos variables de respuesta no se vieron afectadas significativamente ($p>0.05$) (humedad y la coordenada cromática b^* de la corteza) por la variabilidad en el porcentaje de grasa, azúcar y agavinas. Los modelos polinomiales que describen el comportamiento de estas variables, así como el ANOVA realizado en los modelos, se resume en la Tabla 11.

Tabla 11. Análisis de regresión de los modelos de tercer orden para las variables de respuesta analizadas. Donde A (azúcar, %), B (grasa, %) y C (agavinas, %).

COEFICIENTE DE REGRESIÓN	COORDENADA DE COLOR											
	Y ₁	Y ₂	CORTEZA					MIGA				
			Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	Y ₁₂
*A	+3.28	+35.59	+56.38	+9.28	+58.31	+4.59	+21.76	+0.70	+0.46	+0.47	+0.68	+1.49
*B	+3.32	+35.99	+53.07	+9.87	+57.41	+5.04	+24.14	+0.70	+0.46	+0.49	+0.70	+1.51
*C	+2.39	+34.68	+49.58	+16.34	+52.55	+5.69	+21.42	+0.45	+0.36	+0.15	+0.32	+0.84
*A*B	-0.18	+1.23	+15.26	+0.65	+1.95	-0.05	-8.68	+8.74E-003	-0.02	+5.76E-003	-0.16	+0.12
*A*C	-0.39	+1.14	-5.71	+11.02	-8.61	+1.38	+6.66	-0.48	-0.11	-0.62	-0.69	-0.62
*B*C	+0.06	+1.22	+31.51	-5.89	+11.89	-1.69	-4.92	-0.04	+0.03	-0.28	-0.30	-0.54
*A*B*C	+2.64	-12.46	-17.08	-30.55	+30.30	+0.13	+32.00	+1.57	+0.43	+1.69	+2.63	+2.27
*A*B* (A-B)	-1.06	+10.20	+46.98	-30.48	+0.77	+12.82	+32.03	-0.33	-0.21	-0.83	-1.20	-2.25
*A*C* (A-C)	+1.60	-10.51	-12.47	+11.28	+30.73	-14.32	-32.85	+0.26	-7.10E-003	+0.62	+1.58	+1.83
ANOVA												
Modelo	0.0003	0.024	0.042	0.007	0.0007	0.012	0.049	0.0003	0.001	0.0004	0.0006	0.0001
(P-valor)												
Prueba												
bondad de												
ajuste	0.868	0.930	0.633	0.952	0.663	0.713	0.012	0.386	0.452	0.552	0.783	0.261
(P-valor)												
R ²	0.960	0.849	0.819	0.897	0.949	0.877	0.810	0.961	0.940	0.956	0.951	0.981

Y₁ (Altura, cm), Y₂ (Peso, g), Y₃₋₄ (Espacio de color L*, a*, corteza), Y₅₋₇ (Espacio de color L*, a*, b*, miga), Y₈ (Elasticidad), Y₉ (Cohesividad), Y₁₀ (Masticabilidad, kg), Y₁₁ (Gomosidad kg/m s²), Y₁₂ (Dureza, kg m/s²).

7.5.2 Efecto de las variables independientes sobre la altura del producto

La Figura 15 muestra el efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de azúcar y grasa sobre la altura del producto panificable tipo muffin libre de gluten. La altura del producto varió de 2.39 ± 0.07 a 3.32 ± 0.10 cm, mientras que la altura del control (elaborado a base de una harina compuesta de arroz, sorgo y amaranto) fue 2.88 ± 0.10 cm.

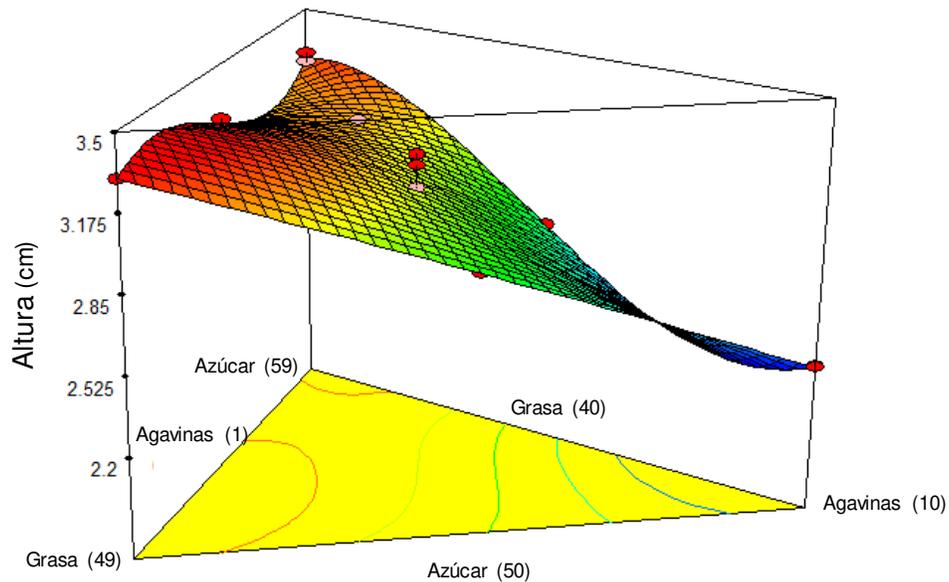


Figura 15. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la altura del producto panificable libre de gluten tipo muffin.

La adición hasta un 10% de agavinas y contenidos bajos de azúcar y grasa (50 y 40%, respectivamente) reducen significativamente la altura del producto final. Resultados similares han sido obtenidos por otros autores, quienes reportan que un reemplazo de grasa por inulina hasta en un 50% provoca la disminución de la altura en productos panificables (Zahn *et al.*; 2010; Rodríguez-García *et al.*; 2014b). Por otro lado, el reemplazo de grasa por agavinas (*Agave angustifolia*) hasta en un 30% produce una disminución significativa en la altura de las galletas elaboradas a base de harina de trigo (Santiago-García *et al.*, 2017).

7.5.3 Efecto de las variables independientes sobre el peso del producto

La Figura 16 muestra el efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de azúcar y grasa sobre el peso del producto panificable tipo muffin libre de gluten. El peso del producto varió de 34.55 ± 0.46 a 36.07 ± 0.49 g, mientras que el peso del control fue 35.92 ± 0.23 g. El uso de altos porcentajes de agavinas (10%) y bajos contenidos de grasa y azúcar (50 y 40%, respectivamente) reducen significativamente el peso del producto final.

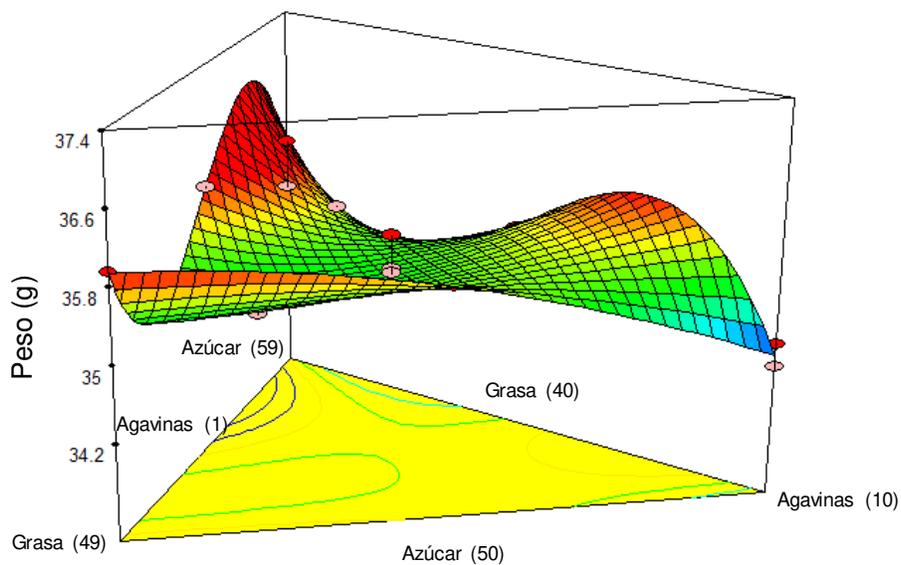


Figura 16. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre el peso del producto panificable libre de gluten tipo muffin.

Resultados similares fueron encontrados por Celik *et al.* (2013), quienes encontraron una reducción significativa del peso en bizcochos al incrementar la concentración de inulina de achicoria de Jerusalén hasta un 10%. Por otro lado, Rodríguez-García *et al.* (2014b) reportaron que el remplazo de grasa por inulina hasta un 50% en bizcochos provoca la reducción significativa de su peso en comparación con el control. Sin embargo, cuando se remplaza azúcar por inulina a niveles de 30-40%, los autores encontraron un aumento de peso en el producto.

Este efecto puede deberse a la mayor capacidad de unión que posee el azúcar con el agua.

7.5.4 Efecto de las variables independientes sobre el color del producto

En términos generales, las coordenadas cromáticas CIEL *a*b* se vieron afectadas cuando la concentración de azúcar y agavinas se incrementó. La Figura 17 muestra el efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar en la luminosidad (Fig. 17.A) y la coordenada cromática a* (Fig. 17.B) de la corteza producto.

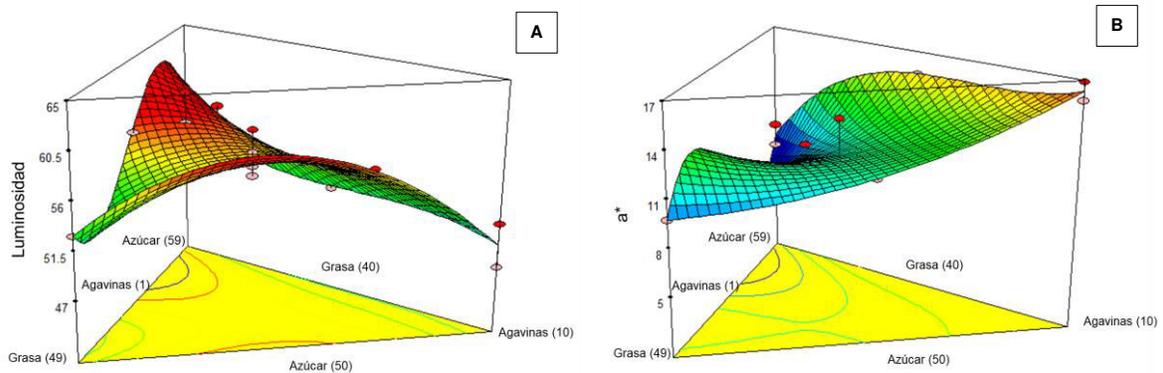


Figura 17. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la luminosidad (a) y la coordenada cromática a* (b) de la corteza del producto panificable libre de gluten tipo muffin.

La luminosidad de la corteza varió de 47.38 ± 0.61 a 58.99 ± 1.55 , lo que indica que es más oscura con respecto al control, 55.30 ± 0.79 . El incremento en el uso de agavinas hasta un 10% da lugar a productos con corteza más oscuras, mientras que la adición de bajas concentraciones (1%) da lugar a productos panificables con menor luminosidad (Fig. 17.A). En el caso de la coordenada cromática a* de la corteza, los valores oscilaron de 8.54 ± 1.00 a 16.89 ± 0.49 , mientras que el control presentó valores de 12.69 ± 0.84 . La coordenada cromática a* tiende a una tonalidad más roja cuándo se utilizan altos porcentajes de agavinas y bajos en azúcar y grasa (10, 50 y 40%, respectivamente).

Celik *et al.* (2013) reportaron que la adición de hasta un 10% de inulina de achicoria de Jerusalén reduce significativamente ($p < 0.05$) las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* de un bizcocho. Este efecto es debido principalmente a la exposición prolongada de la corteza a las temperaturas de horneado, 170°C . La inulina de achicoria de Jerusalén es un polisacárido y las reacciones de pardeamiento no enzimático en la superficie del producto panificable es la causa más probable del cambio del color en su corteza.

La Figura 18 muestra el efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre las coordenadas cromáticas L^* (Fig. 18.A), a^* (Fig. 18.B) y b^* (Fig. 18.C) de la miga del producto. La luminosidad de la miga del producto varió de 51.97 ± 1.87 a 59.26 ± 0.48 , mientras que la coordenada cromática a^* de 4.22 ± 0.05 a 6.24 ± 0.23 , y la coordenada cromática b^* de 20.28 ± 0.20 a 25.11 ± 0.33 . Estos valores indican que la miga del producto elaborado con agavinas como sustituto de grasa y azúcar se encontró dentro de los rangos establecidos por el control (luminosidad de 56.64 ± 0.48 , coordenada cromática a^* y b^* de 5.09 ± 0.11 y 20.93 ± 0.13 , respectivamente). En términos generales, el producto tiende a una coloración más oscura al emplear bajos contenidos de agavinas y grasa, y altos valores de azúcar (1%, 40% y 59%, respectivamente), siendo la luminosidad menos intensa, la coordenada cromática a^* con tendencia a tonalidades verdes y la b^* hacia las tonalidades azules.

Celik *et al.* (2013) reportan que los valores en el color de la miga del bizcocho no fueron afectados por la adición inulina de achicoria de Jerusalén. Por otro lado, Zamora-Gasga *et al.* (2014) informan que, la adición de fibra dietaría de agave (hasta 7g/100g) en la elaboración de barras de granola mostró una reducción significativa en la luminosidad y las coordenadas cromáticas a^* y b^* . En este sentido, con base en los resultados obtenidos en nuestra investigación, al sustituir la grasa por agavinas hasta un 10%, la corteza y la miga del producto panificable tipo muffin tienden a ser más oscuras.

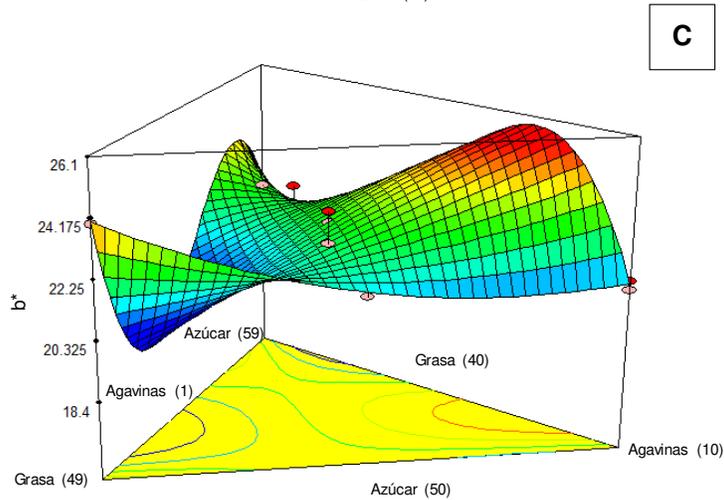
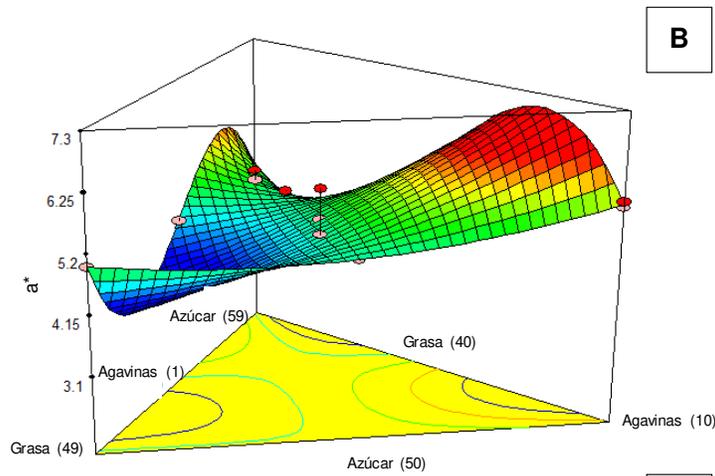
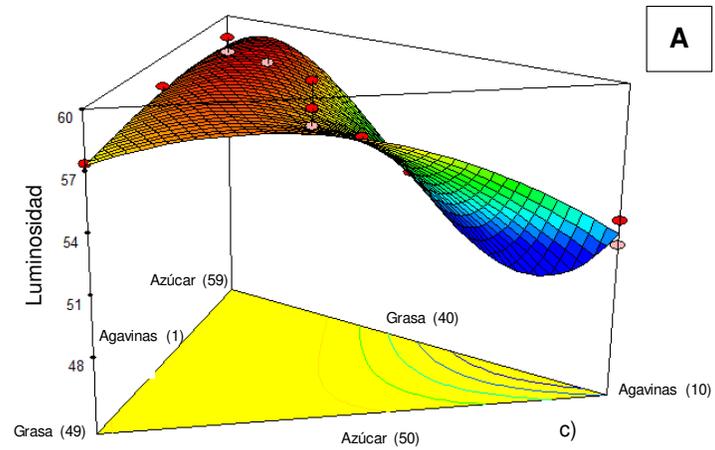


Figura 18. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la luminosidad (a), coordenada cromática a^* (b) y coordenada cromática b^* (c) de la miga del producto panificable libre de gluten tipo muffin.

7.5.5 Efecto de las variables independientes sobre análisis de perfil de textura del producto

La Figura 19 muestra el efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar en la elasticidad (Fig. 19.A), la cohesividad (Fig. 19.B), masticabilidad (Fig. 19.C) y gomosidad (Fig. 19.D) del producto.

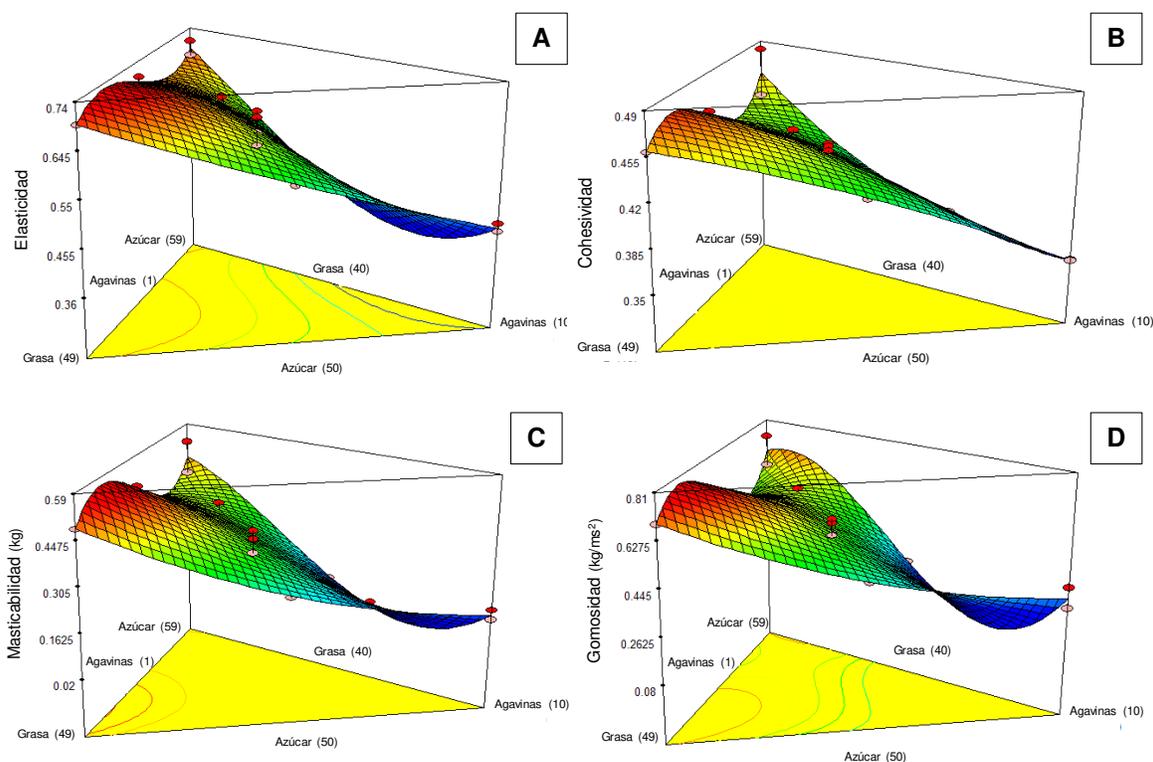


Figura 19. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la elasticidad (a), cohesividad (b), masticabilidad (c) y gomosidad (d) del producto panificable libre de gluten tipo muffin.

La elasticidad del producto panificable libre de gluten y bajo en grasa y azúcar varió de 0.44 ± 0.06 a 0.71 ± 0.04 , la cohesividad de 0.36 ± 0.03 a 0.48 ± 0.01 , la masticabilidad de 0.13 ± 0.04 a 0.53 ± 0.05 kg y la gomosidad de 0.28 ± 0.07 a 0.74 ± 0.04 kg/ms². Los valores de elasticidad, cohesividad, masticabilidad y gomosidad para el producto control (elaborado con harinas libre de gluten) fueron de 0.73 ± 0.01 , 0.48 ± 0.01 , 0.46 ± 0.08 kg y 0.56 ± 0.1 kg/ms², respectivamente. Los valores máximos de elasticidad, cohesividad, masticabilidad y gomosidad se

obtuvieron al utilizar altos contenidos de azúcar y bajos en grasa y agavinas (59, 40 y 1%, respectivamente).

Gao *et al.* (2016) reportaron que, el remplazo de azúcar con inulina (50 y 100%) en muffins elaborados a base de harina de trigo, mostraron una elasticidad significativamente menor (48.95 y 42.27%, respectivamente) en comparación al control (56.34%). Por otro lado, Akewan (2009) mostró que las propiedades del azúcar pueden retardar la gelatinización del almidón, por lo tanto, existe un efecto de ablandamiento en la textura del muffin. Finalmente, Zahn *et al.* (2010) reportaron que el remplazo de grasa por inulina, hasta un 50%, incrementa significativamente la firmeza y elasticidad de la miga, sin embargo, para la cohesividad este parámetro decrece.

La Figura 20 muestra el efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar en la dureza del producto.

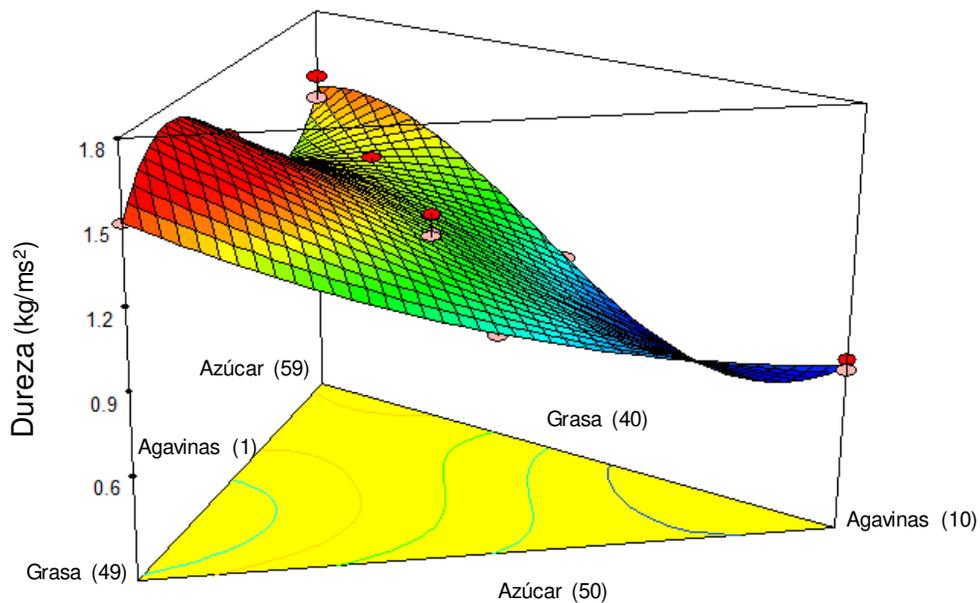


Figura 20. Efecto de la incorporación de agavinas como sustituto de grasa y azúcar sobre la dureza del producto panificable libre de gluten tipo muffin.

La dureza del producto varió de 0.82 ± 0.06 a 1.55 ± 0.15 kg/ms^2 , mientras que la dureza del producto control (elaborado con harinas libres de gluten) fue de 1.28 ± 0.20 kg/ms^2 . Los productos que presentaron mayor dureza fueron aquellos

elaborados con altos contenidos de azúcar y bajos contenidos de grasa y agavinas (59%, 40% y 1%, respectivamente).

Santiago-García *et al.* (2017) observaron que conforme se incrementa la adición de agavinas (*Agave angustifolia*) de 0 al 30% en peso, la dureza de la galleta aumentaba considerablemente (206.93 N/cm²). Resultados similares fueron encontrados al sustituir azúcar, donde el uso de inulina o fibra dieron mayores valores de firmeza en productos panificable tipo muffin. En este sentido, al adicionar mayores concentraciones de inulina son mayores valores de dureza del producto (O'Brien *et al.*, 2003; Psimouli y Oreopoulou, 2013).

Por otro lado, Laguna *et al.* (2014) reportaron que la sustitución de grasa por inulina (30 g/100 g) en la elaboración de galletas, produjo un aumento significativo ($p < 0.05$) en la fuerza máxima durante la fractura, la cual se correlaciona con la dureza. Rodríguez- García *et al.* (2014b) no observaron diferencias significativas en la dureza de bizcochos, cuando se reemplazó el contenido de grasa por inulina hasta un 50%. Sin embargo, cuando se incrementaba el remplazo de azúcar, la dureza disminuía significativamente. Los resultados obtenidos en nuestra investigación difieren con lo reportado por algunos autores, ya que, al aumentar la sustitución de grasa por agavinas hasta en un 10%, la dureza disminuyo (0.81 kg/cms²). Por otro lado, al emplear menores cantidades de agavinas 1%, la dureza del producto incrementa considerablemente (1.52 kg/cms²).

7.5.6 Optimización de las variables

La optimización numérica de las variables de procesamiento se obtuvo después de asignar las siguientes restricciones a la variable respuesta (Tabla 12).

Tabla 12. Restricciones asignadas para la optimización numérica de las variables del proceso.

	RESTRICCIÓN
Altura (cm)	2.88±0.10
Peso (g)	35.92±0.23
L* corteza	55.30±0.79
a* corteza	12.69±0.84
L* miga	56.64±0.48
a* miga	5.09±0.11
b* miga	20.93±0.13
Elasticidad	0.73±0.01
Cohesividad	0.48±0.01
Masticabilidad (kg)	0.46±0.08
Gomosidad (kg/m s²)	0.56±0.10
Dureza (kg/m s²)	1.28±0.20

La optimización de los niveles de azúcar, grasa y agavinas se llevó a cabo utilizando el software Design-Expert 7.0, el cuál arrojó los valores óptimos de 52%, 43% y 4.5% para el azúcar, grasa y agavinas, respectivamente. El valor de la variable de respuesta del producto control (harina compuesta libre de gluten) y el optimizado se puede apreciar en la Tabla 13.

Tabla 13. Optimización numérica obtenida para el producto control (harinas compuesta libre de gluten) vs el producto optimizado (sin gluten, bajo en grasa y azúcar)

	OBJETIVO	LÍMITES BAJOS	LÍMITES ALTOS	ÓPTIMO
Altura (cm)	Objetivo	2.39	3.32	2.99
Peso (g)	Objetivo	34.55	36.07	35.44
L* corteza	Objetivo	47.38	58.99	55.50
a* corteza	Objetivo	8.54	16.89	11.82
L* miga	Objetivo	51.97	59.26	56.88
a* miga	Objetivo	4.22	6.24	5.06
b* miga	Minimizada	20.28	25.11	22.28
Elasticidad	Maximizada	0.44	0.71	0.6
Cohesividad	Maximizada	0.36	0.48	0.43
Masticabilidad (kg)	Objetivo	0.13	0.53	0.33
Gomosidad (kg/m s²)	Objetivo	0.28	0.74	0.53
Dureza (kg/m s²)	Objetivo	0.82	1.55	1.24

7.6 Verificación del modelo

Para verificar la predicción de los modelos, se llevó a cabo una prueba de confirmación utilizando los valores experimentales obtenidos del producto panificable elaborado con las concentraciones óptimas de agavinas, grasa y azúcar (4.5%, 52% y 43%) contra los valores óptimos de cada una de las variables independientes pronosticadas por los modelos (Tabla 14).

Como puede observarse, los valores generados por el modelo para las variables de respuesta se encuentran dentro del rango de los valores medidos experimentalmente, siendo ligeramente diferentes para la cohesividad y la dureza del producto. Por lo tanto, la prueba de confirmación valida los resultados experimentales contra los modelos de regresión.

Tabla 14. Valores experimentales del producto elaborado con 52% de azúcar, 43% de grasa y 4.5% de agavinas frente a los valores óptimos pronosticados por los modelos.

	EXPERIMENTALES	MODELO
Altura (cm)	2.87±0.04	2.98
Peso (g)	35.10±0.37	35.37
L* corteza	55.42±0.39	56.97
a* corteza	10.87±1.23	11.64
L* miga	59.26±0.48	57.43
a* miga	5.55±0.15	5.09
b* miga	22.59±0.23	22.75
Elasticidad	0.60±0.04	0.61
Cohesividad	0.43±0.01	0.43
Masticabilidad (kg)	0.33±0.04	0.31
Gomosidad (kg/m s²)	0.55±0.04	0.50
Dureza (kg/m s²)	1.29±0.07	1.19

7.7 Caracterización producto control (sin gluten) y el optimizado (libre de gluten, bajo en azúcar y grasa)

Los valores de las variables de respuesta para el producto funcionalizado libre de gluten, bajo en grasa y en azúcar (optimizado) y el producto control se resume en la Tabla 15.

Como puede observarse, el producto control y el optimizado presentaron características muy similares. Sin embargo, el producto optimizado mostró un color ligeramente más oscuro (59.26±0.48) que el producto control elaborado a base de harina compuesta (56.64±0.48). Así, los productos panificables con tonalidades más oscuras son asociadas por los consumidores a productos con mayores beneficios para su salud (Casas Moreno *et al.*, 2015). Por otro lado, el producto optimizado también tuvo una miga menos elástica que el control (0.60±0.04 y 0.73±0.01,

respectivamente). Resultados similares fueron reportados por Rodríguez- García *et al.* (2014b) para productos elaborados con inulina como sustituto de grasa y azúcar.

Tabla 15. Valores de las variables de respuesta del control (harina compuesta libre de gluten) y optimizado (producto funcionalizado libre de gluten y bajo contenido en grasa y azúcar)

	CONTROL	OPTIMIZADO
Altura (cm)	2.88±0.10	2.87±0.04
Peso (g)	35.92±0.23	35.10±0.37
L* (corteza)	55.30±0.79	55.42±0.39
a*	12.69±0.84	10.87±1.23
L* (miga)	56.64±0.48	59.26±0.48
a*	5.10±0.11	5.55±0.15
b*	20.93±0.13	22.59±0.23
Dureza (kg/ms²)	1.28±0.20	1.29±0.07
Elasticidad	0.73±0.01	0.60±0.04
Cohesividad	0.48±0.007	0.43±0.01
Masticabilidad (kg)	0.46±0.08	0.33±0.04
Gomosidad (kg/ms²)	0.56±0.10	0.55±0.04

Como se aprecia en la Figura 21, el producto control (a) presentó un color ligeramente más oscuro que el producto optimizado elaborado con agavinas como sustituto de grasa y azúcar (b). Sin embargo, en términos de altura, el producto optimizado (b) es visualmente muy similar al control (a). Sin embargo, los productos elaborados con un 100% de harina de sorgo (c), arroz (d), y amaranto (e) mostraron una menor altura que el producto optimizado.

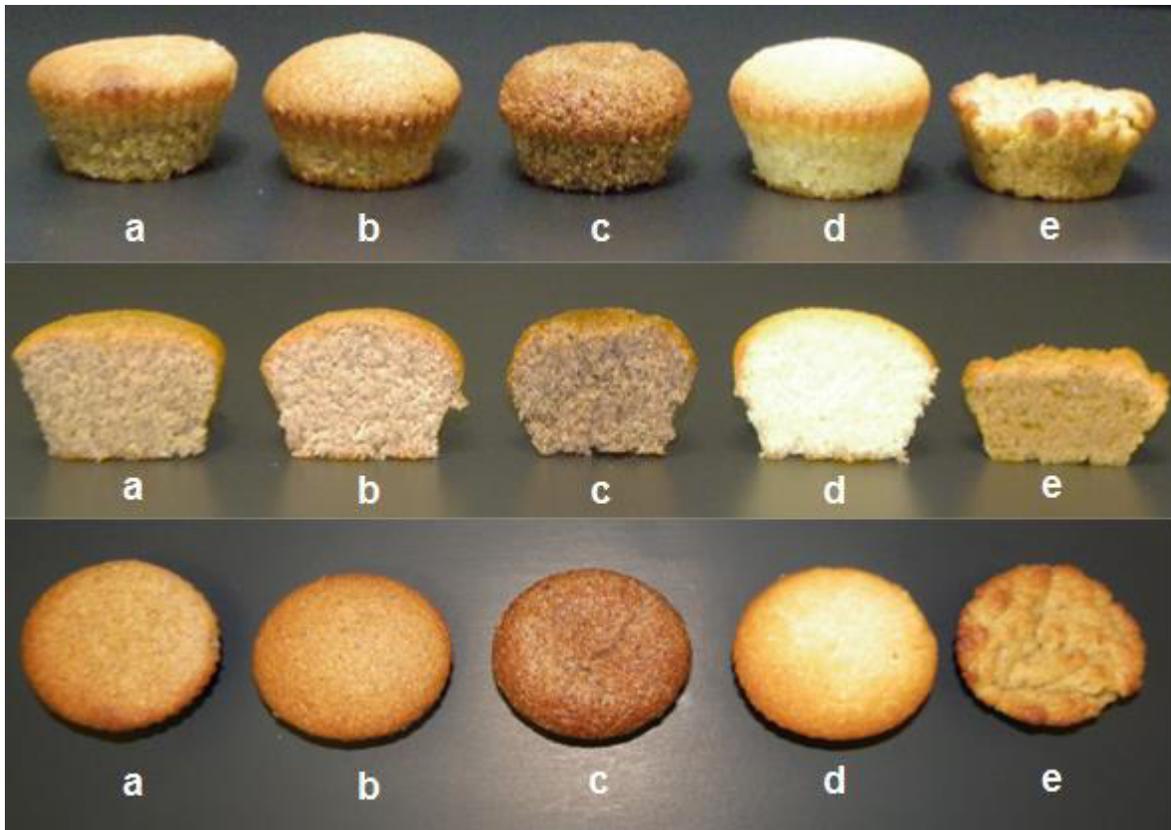


Figura 21. Producto elaborado con la harina compuesta libre de gluten (a), producto optimizado libre de gluten y bajo en azúcar y grasa (b), productos elaborados con 100% harina de sorgo (c), harina de arroz (d), y harina de amaranto (e).

El análisis proximal de los productos finales mostró que el producto optimizado presentó una reducción de grasa del 2%, mientras que hubo un incremento del 1% de carbohidratos con respecto al control, los cuales pueden estar relacionados con la adición de las agavinas (Tabla 16). Santiago-García *et al.* (2017) reportan que al incrementar los porcentajes de agavinas (10-30%) como sustituto de grasa, la humedad y los carbohidratos del producto aumentan significativamente (4.81 a 5.93%; 73 a 78%, respectivamente). De acuerdo con Capriles *et al.* (2009), los fructanos son moléculas hidrofílicas con la habilidad de formar puentes con las moléculas del agua, por lo tanto, éstos pueden afectar la retención de agua durante el horneado. La funcionalidad tecnológica de las agavinas como un sustituto de grasa se puede atribuir a su capacidad para formar geles cremosos cuando se calientan en medios acuosos. Esto es debido a que ocluyen a una gran cantidad de agua, creando una textura fina y cremosa (Franck, 2002).

Tabla 16. Análisis químico proximal del producto final (optimizado y control)

	CONTROL	OPTIMIZADO
PROTEÍNA (%)	6.64 ± 0.04	7.24 ± 0.09
GRASA (%)	27.38 ± 0.05	14.18 ± 0.04
FIBRA CRUDA (%)	0.35 ± 0.01	0.30 ± 0.02
HUMEDAD (%)	10.90 ± 0.04	14.96 ± 0.05
CENIZA (%)	1.33 ± 0.03	1.62 ± 0.02
CARBOHIDRATOS (%)	53.71 ± 0.06	61.96 ± 0.04

La Figura 22 muestra los resultados de la evaluación sensorial realizada al producto panificable optimizado frente al producto control. Para los diferentes rubros, los panelistas no encontraron diferencias significativas ($p>0.05$) entre el producto optimizado y el control (Figura 22).

Rodríguez-García *et al.* (2014b), al reemplazar grasa hasta un 50% por inulina y azúcar hasta un 30% por oligofructosa en bizcochos, no encontraron diferencias significativas en la aceptabilidad general, textura, sabor y color del producto en comparación con el control. Por otro lado, Laguna *et al.* (2014) observaron que el remplazo de grasa hasta 15 g/100 g con inulina o HPMC (hidroxipropil metilcelulosa) daba lugar a galletas con una buena aceptabilidad. Sin embargo, si el remplazo aumentaba (30 g/100 g), la aceptabilidad del producto disminuía. Finalmente, Santiago-García *et al.*, (2017) reportaron que no hubo diferencias significativas ($p>0.05$) en la aceptabilidad general en galletas donde se sustituyó grasa (10-20%) por fructanos tipo agavinas (*Agave angustifolia*).

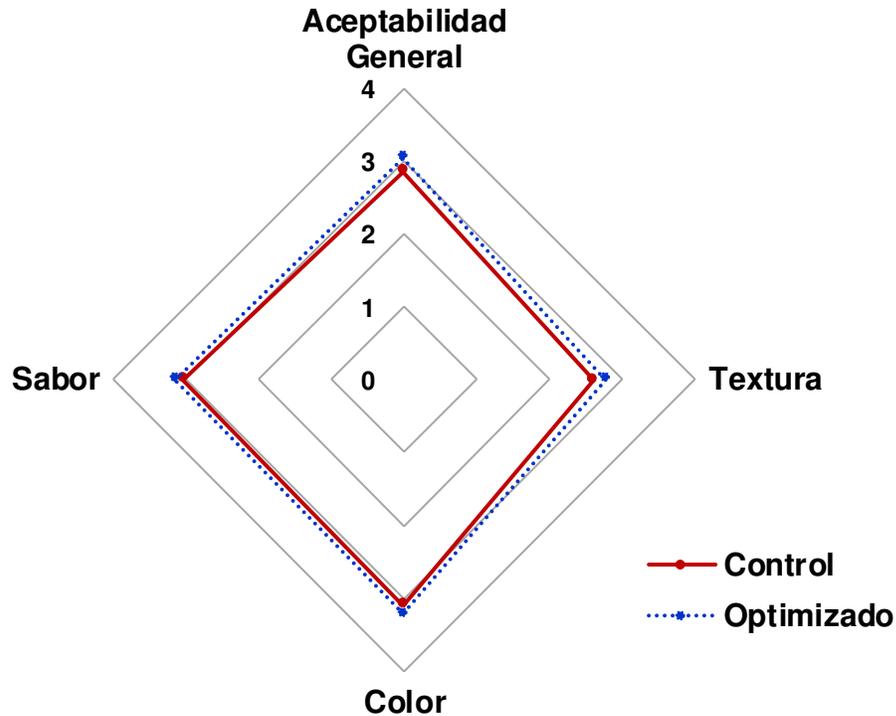


Figura 22. Atributos sensoriales del producto panificable control (harina de trigo integral) y el optimizado (harinas libres de gluten)

En esta segunda etapa, la Metodología Superficie de Respuesta se utilizó con éxito para la optimización de los porcentajes de grasa, azúcar y agavinas en la preparación de un producto panificable funcional. Los cambios en la proporción de grasa, azúcar y agavinas en la formulación del producto panificable tipo muffin tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) en la altura y el peso del producto final, el color de la corteza y miga y el perfil de textura de la miga. Con base en los resultados de la presente investigación, es posible sustituir la grasa y el azúcar por las agavinas, sin afectar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del producto final. Futuras investigaciones deben centrarse en evaluar el efecto prebiótico y funciones metabólicas *in vivo* de la adición de fructanos tipo agavinas en productos panificables.

VIII. CONCLUSIONES GENERALES

La sustitución de la harina de trigo integral por una harina compuesta libre de gluten (sorgo, arroz y amaranto) afectó las características físicas, texturales, sensoriales y nutricionales del producto panificable tipo muffin. Sin embargo, el estudio muestra que es posible realizar la sustitución total de la harina de trigo por harina de arroz, sorgo y amaranto en una proporción de 50%, 39% y 11%, respectivamente, sin impactar en las características físicas del producto final. Para el análisis sensorial, en el caso del color y el sabor, los panelistas no encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el producto optimizado (harina compuesta libre de gluten) y el control (harina de trigo integral). Sin embargo, en la aceptabilidad general y la textura, pese a que el producto optimizado obtuvo calificaciones ligeramente más bajas que el control, ambos productos tuvieron una evaluación general positiva. Así mismo, el análisis proximal de los productos finales mostró que la composición química del producto optimizado era muy similar a la del control, con diferencias en su composición inferiores al 2%.

Por otro lado, los resultados arrojados por esta investigación muestran el potencial que tienen los fructanos tipo agavinas (*Agave tequilana* Weber azul) como remplazo de grasa y azúcar. El uso de un 4.5% de agavinas puede utilizarse para elaborar productos panificables bajos en grasa y azúcar con propiedades físicas muy similares al control, elaborado a base de una harina compuesta libre de gluten (formulada con arroz, sorgo y amaranto). El análisis bromatológico muestra que fue posible reducir la grasa hasta en un 2% con el uso de agavinas. Sin embargo, hubo un incremento del 1% en los carbohidratos, lo cual podría estar estrechamente ligado a la adición de fructanos. Finalmente, el producto panificable tuvo una buena aceptabilidad general en comparación con el control (harina compuesta libre de gluten). Por lo tanto, el uso de fructanos tipo agavinas (*Agave tequilana* Weber azul) como sustituto parcial de grasa y azúcar fue efectivo con ventajas tecnológicas y nutrimentales.

IX. CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA

Artículos científicos

Nieto-Mazzocco, E., Saldaña-Robles, A., Franco-Robles, E., Rangel-Contreras, A. K., Cerón-García, A., Ozuna, C. (Enviado al *Journal of Food Science and Technology*, 15 de octubre de 2018). Optimization of sorghum, rice, and amaranth flour levels in the development of gluten free bakery products using Response Surface Methodology.

Contribución a congresos

Rangel-Contreras, A. K., Nieto-Mazzocco, E., Ozuna, C. (2017). Caracterización de harinas libres de gluten y su aplicación en productos panificables de elevada calidad. *Revista de Divulgación Científica. Jóvenes en la Ciencia*, 3(2), 2000-2004.

Nieto-Mazzocco, E., Cerón-García, A., Saldaña-Robles, A., Franco-Robles, E., Ozuna, C. (2017). Efecto de la concentración de harinas libres de gluten sobre las propiedades físicas y sensoriales de muffins. Congreso Internacional de Inocuidad Alimentaria Seguridad Alimentaria 2017. Congreso Nacional sobre Sostenibilidad ante el Desperdicio de Alimentos. Chihuahua, Chihuahua. 15-17 noviembre de 2017.

Nieto-Mazzocco, E., Rangel-Contreras, A. K., Saldaña-Robles, A., Abraham-Juárez, M. R., Ozuna, C. (2017). Caracterización de harinas libres de gluten y su incorporación en productos de panificación. IV Congreso Internacional sobre Innovación y Tendencias en Procesamiento de Alimentos. XIX Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Zacatecas, Zacatecas. 17-19 de mayo de 2017.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelghafor, R. F., Mustafa, A. I., Ibrahim, A. M., y Krishnan, P. G. (2011). Quality of bread from composite flour of sorghum and hard white winter wheat. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 3(1), 9-15.
- Abdullah, M. Z., Guan, L. C., Lim, K. C., y Karim, A. A. (2004). The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 125–135.
- Adebowale, A. A., Adegoke, M. T., Sanni, S. A., Adegunwa, M. O., y Fetuga, G. O. (2012). Functional properties and biscuit making potentials of sorghum-wheat flour composite. *American Journal of Food Technology*, 7(6), 372-379.
- Ahmed, S. O., Abdalla, A. W. H., Inoue, T., Ping, A., & Babiker, E. E. (2014). Nutritional quality of grains of sorghum cultivar grown under different levels of micronutrients fertilization. *Food Chemistry*, 159, 374-380.
- Aidoo, R. P., Afoakwa, E. O., y Dewettinck, K. (2014). Optimization of inulin and polydextrose mixtures as sucrose replacers during sugar-free chocolate manufacture – Rheological, microstructure and physical quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 126, 35-42.
- Akesowan, A. (2009). Quality of reduced-fat chiffon cakes prepared with erythritol-sucralose as replacement for sugar. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(9), 1383- 1386.
- Almendras, S., Carlos, J., Kirigin, A., y Antonio, J. (2010). Harinas compuestas de sorgo-trigo para panificación. *Revista Boliviana de Química*, 27(1), 19-28.
- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., y Gallagher, E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(sup4), 240-257.
- Apolinario, A. C., de Lima Damasceno, B. P. G., de Macedo Beltrao, N. E., Pessoa, A., Converti, A., y da Silva, J. A. (2014). Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate polymers*, 101, 368-378.
- Aragon-Alegro, L. C., Alarcon Alegro, J. H., Roberta Cardarelli, H., Chih Chiu, M., y Isay Saad, S. M. (2007). Potentially probiotic and synbiotic chocolate mousse. *LWT Food Science and Technology*, 40(4), 669-675.
- Arendt, E. K., y Zannini, E. (2013). Cereal grains for the food and beverage industries. *Woodhead publishing series in food science, technology and nutrition*, 248, 114-146, 283-305, 439-466.

- Badi, S., Pedersen, B., Monowar, L., y Eggum, B. O. (1990). The nutritive value of new and traditional sorghum and millet foods from Sudan. *Plant Foods for Human Nutrition*, 40(1), 5-19.
- Badwaik, L. S., Prasad, K., y Seth, D. (2014). Optimization of ingredient levels for the development of peanut based fiber rich pasta. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2713-2719.
- Blair, G. S. (1958). Rheology in food research. In *Advances in food research* (Vol. 8, pp. 1-61). Academic Press.
- Bartolozzo, J., Borneo, R., y Aguirre, A. (2016). Effect of triticale-based edible coating on muffin quality maintenance during storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(1), 88-95
- 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(5), 602-618.
- Bourne, M.C. (1978). Texture Profile Analysis. *Food Technology*, vol. 32, no. 1, p. 62-66.
- Brambillasca, S., Zunino, P., y Cajarville, C. (2015). Addition of inulin, alfalfa and citrus pulp in diets for piglets: Influence on nutritional and faecal parameters, intestinal organs, and colonic fermentation and bacterial populations. *Livestock Science*, 178, 243-250.
- Brasil, J. A., Silveira, K. C. da, Salgado, S. M., Livera, A. V. S., Faro, Z. P. de, y Guerra, N. B. (2011). Effect of the addition of inulin on the nutritional, physical and sensory parameters of bread. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 47(1), 185-191.
- Brennan, C. S., y Samyue, E. (2004). Evaluation of Starch Degradation and Textural Characteristics of Dietary Fiber Enriched Biscuits. *International Journal of Food Properties*, 7(3), 647-657.
- Brennan, Charles S., y Cleary, L. J. (2005). The potential use of cereal (1→3,1→4)-β-d-glucans as functional food ingredients. *Journal of Cereal Science*, 42(1), 1- 13.
- Capriles, V. D., dos Santos, F. G., y Arêas, J. A. G. (2016). Gluten-free breadmaking: Improving nutritional and bioactive compounds. *Journal of Cereal Science*, 67, 83-91.
- Capriles, V. D., Soares, R. A. M., Silva, M. E. M. P. e, y Arêas, J. A. G. (2009). Effect of fructans-based fat replacer on chemical composition, starch digestibility and sensory acceptability of corn snacks. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(10), 1895-1901.

- Carabin, I. G., y Flamm, W. G. (1999). Evaluation of Safety of Inulin and Oligofructose as Dietary Fiber. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 30(3), 268-282.
- Cardarelli, H. R., Buriti, F. C. A., Castro, I. A., y Saad, S. M. I. (2008). Inulin and oligofructose improve sensory quality and increase the probiotic viable count in potentially synbiotic petit-suisse cheese. *LWT - Food Science and Technology*, 41(6), 1037-1046.
- Carpio, J. M. S. (2009). Estudio de factibilidad técnica para la producción de harina de amaranto (*Amaranthus spp*). Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador, 1-95.
- Casas Moreno, M. D. M., Barreto-Palacios, V., Gonzalez-Carrascosa, R., Iborra-Bernad, C., Andres-Bello, A., Martínez-Monzó, J., y García-Segovia, P. (2015). Evaluation of textural and sensory properties on typical Spanish small cakes designed using alternative flours. *Journal of Culinary Science & Technology*, 13(1), 19-28.
- Castro Montero, E., y de Hombre Morgado, R. A. (2007). Parámetros mecánicos y textura de los alimentos. *Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria, La Habana (Cuba)*.
- Celik, I., Isik, F., Gursoy, O., Y Yilmaz, Y. (2013). Use of Jerusalem Artichoke (*Helianthus Tuberosus*) Tubers as a Natural Source of Inulin in Cakes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37(5), 483-488.
- Chatterton, N. J., y Harrison, P. A. (1997). Fructan oligomers in *Poa ampla*. *New Phytologist*, 136(1), 3-10.
- Chauhan, A., Saxena, D. C., y Singh, S. (2016). Physical, textural, and sensory characteristics of wheat and amaranth flour blend cookies. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1125773.
- Cherbut, C. (2002). Inulin and oligofructose in the dietary fibre concept. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S159.
- Ciacci, C., Maiuri, L., Caporaso, N., Bucci, C., Del Giudice, L., Rita Massardo, D., Londei, M. (2007). Celiac disease: In vitro and in vivo safety and palatability of wheat-free sorghum food products. *Clinical Nutrition*, 26(6), 799-805.
- Costa, F., Cappellin, L., Longhi, S., Guerra, W., Magnago, P., Porro, D., y Gasperi, F. (2011). Assessment of apple (*Malus× domestica* Borkh.) fruit texture by a combined acoustic-mechanical profiling strategy. *Postharvest Biology and Technology*, 61(1), 21-28.
- Crispín-Isidro, G., Lobato-Calleros, C., Espinosa-Andrews, H., Alvarez-Ramirez, J., y Vernon-Carter, E. J. (2015). Effect of inulin and agave fructans addition on the

- rheological, microstructural and sensory properties of reduced-fat stirred yogurt. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1, Part 2), 438-444.
- de la Barca, A. M. C., 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 for Human Nutrition*, 65(3), 241-246.
- Dai, D., Nanthkumar, N. N., Newburg, D. S., y Walker, W. A. (2000). Role of Oligosaccharides and Glycoconjugates in Intestinal Host Defense. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 30, S23.
- D. Capriles, V., y G. Arêas, J. A. (2013). Effects of prebiotic inulin -type fructans on structure, quality, sensory acceptance and glycemic response of gluten-free breads. *Food & Function*, 4(1), 104-110.
- De Bruyn, A., Alvarez, A. P., Sandra, P., y De Leenheer, L. (1992). Isolation and identification of O-beta-D-fructofuranosyl-(2-->1)-O-beta-D-fructofuranosyl-(2-->1)-D-fructose, a product of the enzymic hydrolysis of the inulin from *Cichorium intybus*. *Carbohydrate Research*, 235, 303-308.
- De Castro Fabiane P, Cunha Thiago M, Barreto Pedro L M, Amboni Renata D De M C, y Prudêncio Elane S. (2008). Effect of oligofructose incorporation on the properties of fermented probiotic lactic beverages. *International Journal of Dairy Technology*, 62(1), 68-74.
- de Moura, F. A., Pereira, J. M., da Silva, D. O., Zavareze, E. da R., da Silveira Moreira, A., Helbig, E., y Dias, A. R. G. (2011). Effects of oxidative treatment on the physicochemical, rheological and functional properties of oat β -glucan. *Food Chemistry*, 128(4), 982-987.
- Delmoro, J., Muñoz, D., Nadal, V., Clementz, A., y Pranzetti, V. (2010). El color en los alimentos: determinación de color en mieles. Invenio: *Revista de investigación académica*, (25), 145-152.: 13, 145–152.
- Delzenne, N. M., Daubioul, C., Neyrinck, A., Lasa, M., y Taper, H. S. (2002). Inulin and oligofructose modulate lipid metabolism in animals: review of biochemical events and future prospects. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S255-S259.
- Devereux H.M., Jones G.P., McCormack L., y Hunter W.C. (2006). Consumer Acceptability of Low Fat Foods Containing Inulin and Oligofructose. *Journal of Food Science*, 68(5), 1850-1854.
- Duodu, K. G., Taylor, J. R. N., Belton, P. S., y Hamaker, B. R. (2003). Factors affecting sorghum protein digestibility. *Journal of Cereal Science*, 38(2), 117- 131.

- Earp, C. F., Doherty, C. A., y Rooney, L. W. (1983). Fluorescence microscopy of the pericarp, aleurone layer, and endosperm cell walls of three sorghum cultivars. *Cereal chemistry. cell-walls of 3 sorghum cultivars. Cereal Chemistry*, 60, 408–410.
- Eckburg, P. B., Bik, E. M., Bernstein, C. N., Purdom, E., Dethlefsen, L., Sargent, M. y Relman, D. A. (2005). Diversity of the Human Intestinal Microbial Flora. *Science*, 308(5728), 1635-1638.
- El-Nagar G, Clowes G, Tudorică C M, Kuri V, y Brennan C S. (2002). Rheological quality and stability of yog-ice cream with added inulin. *International Journal of Dairy Technology*, 55(2), 89-93.
- Espinosa-Andrews, H., y Urias-Silvas, J. E. (2012). Thermal properties of agave fructans (*Agave tequilana* Weber var. *Azul*). *Carbohydrate Polymers*, 87(4), 2671-2676.
- Espitia Cedillo, José Ignacio Tesis.pdf. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6864/63486%20ESPITIA%20CEDILLO,%20JOSE%20IGNACIO%20%20TESIS.pdf?sequence=1>
- Ezeogu, L. I., Duodu, K. G., y Taylor, J. R. N. (2005). Effects of endosperm texture and cooking conditions on the in vitro starch digestibility of sorghum and maize flours. *Journal of Cereal Science*, 42(1), 33-44.
- FAO, 1999. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/inpho/docs/Post_Harvest_Compndium_-_SORGHUM.pdf
- FAO, 2012. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/en/#search/sorghum>
- Farzanmehr, H., y Abbasi, S. (2009). Effects of inulin and bulking agents on some physicochemical, textural and sensory properties of milk chocolate. *Journal of Texture Studies*, 40(5), 536-553., textural and sensory properties of milk chocolate. *Journal of Texture Studies*, 40(5), 536-553.
- Flamm, G., Glinsmann, W., Kritchevsky, D., Prosky, L., y Roberfroid, M. (2001). Inulin and Oligofructose as Dietary Fiber: A Review of the Evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 41(5), 353-362.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, y World Health Organization (Eds.). (2006). *Probiotics in food: health and nutritional properties and guidelines for evaluation*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations: World Health Organization.
- Food Composition Databases Show Foods -- Barley, pearled, raw. Recuperado 3 de abril de 2018, de <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/6477>

- Forker, A., Zahn, S., y Rohm, H. (2012). A Combination of Fat Replacers Enables the Production of Fat-reduced Shortdough Biscuits with High-sensory quality. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2497-2505.
- Franck, A. (2002). Technological functionality of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S287.
- Franco-Robles, E., y López, M. G. (2015). Implication of Fructans in Health: Immunomodulatory and Antioxidant Mechanisms. *The Scientific World Journal*, 2015, 1-15.
- Gallagher, E., Gormley, T. R., y Arendt, E. K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 15(3-4), 143-152.
- Gallagher, E., O'Brien, C. M., Scannell, A. G. M., y Arendt, E. K. (February 1, 2003a). Evaluation of sugar replacers in short dough biscuit production. *Journal of Food Engineering*, 56(2), 261-263.
- Gallagher, E., O'Brien, C. M., Scannell, A. G. M., y Arendt, E. K. (February 1, 2003b). Use of response surface methodology to produce functional short dough biscuits. *Journal of Food Engineering*, 56(2), 269-271.
- Gamel, T. H., Linssen, J. P., Mesallam, A. S., Damir, A. A., y Shekib, L. A. (2006). Seed treatments affect functional and antinutritional properties of amaranth flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(7), 1095-1102.
- Gao, J., Brennan, M. A., Mason, S. L., y Brennan, C. S. (2016). Effect of sugar replacement with stevianna and inulin on the texture and predictive glycaemic response of muffins. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(9), 1979-1987.
- García, F. E. V., Estepa, C. M. E., y Torres, S. B. (2008). Efecto de la sustitución con polydextrosa y CMC en la calidad sensorial de tortas con bajo contenido de sacarosa. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(2), 5.
- García-Vieyra, M. I., Del Real, A., y López, M. G. (2014). Agave Fructans: their effect on mineral absorption and bone mineral content. *Journal of Medicinal Food*, 17(11), 1247-1255.
- Garzón, M. A. G., Acosta, L. M. V., Cardona, L. de J. M., Hurtado, M. A. A., y Ro, A. C. D. (2012). Desarrollo de un producto de panadería con alto valor nutricional a partir de la harina obtenida del banano verde con cáscara: una nueva opción para el aprovechamiento de residuos de la industria de exportación. *Producción Limpia*, 6(1).

- Ghosh, S., y Sudha, M. L. (2012). A review on polyols: new frontiers for health-based bakery products. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(3), 372-379.
- Gomez, E., Tuohy, K. M., Gibson, G. R., Klinder, A., y Costabile, A. (2010). In vitro evaluation of the fermentation properties and potential prebiotic activity of Agave fructans. *Journal of Applied Microbiology*, 108(6), 2114-2121.
- Gómez, M., Ronda, F., Blanco, C. A., Caballero, P. A., y Apesteguía, A. (2003). Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality. *European Food Research and Technology*, 216(1), 51-56.
- Guggisberg, D., Cuthbert-Steven, J., Piccinali, P., Bütikofer, U., y Eberhard, P. (2009). Rheological, microstructural and sensory characterization of low-fat and whole milk set yoghurt as influenced by inulin addition. *International Dairy Journal*, 19(2), 107-115.
- Gulati, N. (2012). Ectopic Thymoma- Presenting as a Large Pleural Mass. *Journal of Pulmonary & Respiratory Medicine*, 02(06).
- Handa, C., Goomer, S., y Siddhu, A. (2012). Physicochemical properties and sensory evaluation of fructoligosaccharide enriched cookies. *Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 192-199.
- Handa, C., Goomer, S., y Siddhu, A. (2010). Effects of whole-multigrain and fructoligosaccharide incorporation on the quality and sensory attributes of cookies. *Food science and technology research*, 17(1), 45-54.
- Hennelly, P. J., Dunne, P. G., O'Sullivan, M., y O'Riordan, E. D. (2006). Textural, rheological and microstructural properties of imitation cheese containing inulin. *Journal of Food Engineering*, 75(3), 388-395.
- Hernández, Elizabeth. (2005). Evaluación sensorial. Universidad Nacional Abierta ya Distancia-UNAD. Bogotá, Colombia.
- Hernandez, A. G. (DRT). (2010). *Tratado de nutrición / Nutrition Treatise: Composición Y Calidad Nutritiva De Los Alimentos / Composition and Nutritional Quality of Foods*. Ed. Médica Panamericana.
- Huerta-Ocampo, J. A., y de la Rosa, A. B. (2012). Caracterización bioquímica y estructural de las proteínas de reserva de amaranto. *Amaranto: ciencia y tecnología*, 293-302.
- Hleap, J. I., y Velasco, V. A. (2010). Analysis of the properties of texture during the storage of sausage made from red tilapia (*Oreochromis* sp.). *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8(2), 46-56.
- International Commission on Illumination. (2004). Libro blanco de la gestión del color 3. Espacios de color y conversión de colores. 3. Francia. Retrieved August 15,

2014, from https://www.lacie.com/download/whitepaper/wp_colormanagement_3_es.pdf

- Iñiguez-Covarrubias, G., Díaz-Teres, R., Sanjuan-Dueñas, R., Anzaldo-Hernández, J., y Rowell, R. M. (2001). Utilization of by-products from the tequila industry. Part 2: potential value of *Agave tequilana* Weber azul leaves. *Bioresource Technology*, 77(2), 101-108.
- Jacobsen, S-E.; Iteno, K.; Mujica, A. (2002). Amaranto como un cultivo nuevo en el norte de Europa. *Agronomía Tropical*. 52:109-119.
- Ji, Y., Zhu, K., Qian, H., y Zhou, H. (2007). Staling of cake prepared from rice flour and sticky rice flour. *Food Chemistry*, 104(1), 53-58.
- Juszczak, L., Witczak, T., Ziobro, R., Korus, J., Cieślik, E., y Witczak, M. (2012). Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Carbohydrate Polymers*, 90(1), 353-360.
- Kamarul Zaman, M., Chin, K.-F., Rai, V., y Majid, H. A. (2015). Fiber and prebiotic supplementation in enteral nutrition: A systematic review and meta-analysis. *World Journal of Gastroenterology: WJG*, 21(17), 5372-5381.
- Karimi, R., Azizi, M. H., Ghasemlou, M., y Vaziri, M. (2015). Application of inulin in cheese as prebiotic, fat replacer and texturizer: A review. *Carbohydrate Polymers*, 119, 85-100.
- Kaur, N., y Gupta, A. K. (2002). Applications of inulin and oligofructose in health and nutrition. *Journal of Biosciences*, 27(7), 703-714.
- Keenan, D. F., Resconi, V. C., Kerry, J. P., y Hamill, R. M. (2014). Modelling the influence of inulin as a fat substitute in comminuted meat products on their physico-chemical characteristics and eating quality using a mixture design approach. *Meat Science*, 96(3), 1384-1394.
- Kelly, G. (2008). Inulin-type prebiotics--a review: part 1. *Alternative Medicine Review*, 13(4).
- Kigel, J. (2018). Development and ecophysiology of Amaranths. In *Amaranth biology, chemistry, and technology* (pp. 39-73). CRC Press.
- Kim, Y., Faqih, M. N., y Wang, S. S. (2001). Factors affecting gel formation of inulin. *Carbohydrate Polymers*, 46(2), 135-145.
- Kim, E. H. J., Corrigan, V. K., Wilson, A. J., Waters, I. R., Hedderley, D. I., y Morgenstern, M. P. (2012). Fundamental fracture properties associated with sensory hardness of brittle solid foods. *Journal of Texture Studies*, 43(1), 49-62.
- Kip, P., Meyer, D., y Jellema, R. H. (2006). Inulins improve sensoric and textural properties of low-fat yoghurts. *International Dairy Journal*, 16(9), 1098-1103.

- Koca, N., y Metin, M. (2004). Textural, melting and sensory properties of low-fat fresh kashar cheeses produced by using fat replacers. *International Dairy Journal*, 14(4), 365-373.
- Kolida, S., y Gibson, G. R. (2007). Prebiotic Capacity of Inulin-Type Fructans. *The Journal of Nutrition*, 137(11), 2503S-2506S.
- Krasaekoopt, W., y Watcharapoka, S. (2014). Effect of addition of inulin and galactooligosaccharide on the survival of microencapsulated probiotics in alginate beads coated with chitosan in simulated digestive system, yogurt and fruit juice. *LWT-Food Science and Technology*, 57(2), 761-766.
- Konopacka, D., y Plochanski, W. J. (2004). Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability. *Postharvest Biology and Technology*, 32(2), 205-211.
- Kurek, M. A., Wyrwicz, J., y Wierzbicka, A. (2017). Optimization of beta-glucan and water content in fortified wheat bread using Response Surface Methodology according to staling kinetics. *LWT - Food Science and Technology*, 75, 352-357.
- Laere, A. V., y Ende, W. V. D. (2002). Inulin metabolism in dicots: chicory as a model system. *Plant, Cell & Environment*, 25(6), 803-813.
- Laguna, L., Primo-Martín, C., Varela, P., Salvador, A., y Sanz, T. (2014). HPMC and inulin as fat replacers in biscuits: Sensory and instrumental evaluation. *LWT - Food Science and Technology*, 56(2), 494-501.
- Laguna, L., Primo-Martín, C., Salvador, A., y Sanz, T. (2013). Inulin and erythritol as sucrose replacers in short-dough cookies: sensory, fracture, and acoustic properties. *Journal of Food Science*, 78(5), S777-S784.
- Lamacchia, C., Camarca, A., Picascia, S., Di Luccia, A., y Gianfrani, C. (2014). Cereal-Based Gluten-Free Food: How to Reconcile Nutritional and Technological Properties of Wheat Proteins with Safety for Celiac Disease Patients. *Nutrients*, 6(2), 575-590.
- Lebesi, D. M., y Tzia, C. (2011). Effect of the addition of different dietary fiber and edible cereal bran sources on the baking and sensory characteristics of cupcakes. *Food and bioprocess technology*, 4(5), 710-722.
- León, K., Mery, D., Pedreschi, F., y León, J. (2006). Color measurement in Lab units from RGB digital images. In *Food Research International* (Vol. 39, pp. 1084– 1091).
- Letexier, D., Diraison, F., y Beylot, M. (2003). Addition of inulin to a moderately high-carbohydrate diet reduces hepatic lipogenesis and plasma triacylglycerol concentrations in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 77(3), 559-564.

- Livingston, D. P., Chatterton, N. J., y Harrison, P. A. (1993). Structure and quantity of fructan oligomers in oat (*Avena* spp.). *New Phytologist*, 123(4), 725-734.
- Lobato, L. P., Grossmann, M. V. E., y Benassi, M. T. (2009). Inulin Addition in Starch-based Dairy Desserts: Instrumental Texture and Sensory Aspects. *Food Science and Technology International*, 15(4), 317-323.
- Loo, V., y E, J. A. (2004). Prebiotics Promote Good Health: The Basis, the Potential, and the Emerging Evidence. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 38, S70.
- Lopez, M. G., Mancilla-Margalli, N. A., y Mendoza-Diaz, G. (2003). Molecular structures of fructans from *Agave tequilana* Weber var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(27), 7835-7840.
- Mancilla-Margalli, N. A., y López, M. G. (2006). Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from Agave and Dasyliirion species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(20), 7832-7839.
- Martínez-Cervera, S., Sanz, T., Salvador, A., y Fiszman, S. M. (2012). Rheological, textural and sensorial properties of low-sucrose muffins reformulated with sucralose/polydextrose. *LWT-Food Science and Technology*, 45(2), 213-220.
- Maxon, E., Fryar, W., Rooney, L., y Krishnaprasad, M. (1971). Milling properties of sorghum grain with different proportions of corneous to floury endosperm. *Cereal Chemistry*, 48, 478-489.
- Mellado, M. de las M. S., Haros, M., Mellado, M. de las M. S., y Haros, M. (2016). Evaluación de la calidad tecnológica, nutricional y sensorial de productos de panadería por sustitución de harina de trigo por harina integral de arroz. *Brazilian Journal of Food Technology*, 19.
- Meyer, D. (2009). *Handbook of Hydrocolloids*. Elsevier.
- Meyer, D., Bayarri, S., Tárrega, A., y Costell, E. (2011). Inulin as texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25(8), 1881-1890.
- Midrula, D., Gupta, R. K., y Manikantan, M. R. (2007). Effect of Incorporation of Sorghum Flour to Wheat Flour on Quality of Biscuits fortified with defatted soy flour., 428-434.
- Milde, L. B., Valle Urbina, C., Rybak, A., Oliveira, C., y González, K. G. (2009). Metodología de Superficie de Respuesta para Optimizar Panificado Libre de Gluten con Grasa, Huevo y Leche. *Revista de Ciencia y Tecnología*, (11), 55- 58.
- Modzelewska-Kapituła Monika, y Kłębukowska Lucyna. (2009). Investigation of the potential for using inulin HPX as a fat replacer in yoghurt production. *International Journal of Dairy Technology*, 62(2), 209-214.

- Montgomery, B. M. (1984). Individual differences and relational interdependences in social interaction. *Human Communication Research*, 11(1), 33-60.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda). Limusa Wiley.
- Moroni, A. V., Dal Bello, F., y Arendt, E. K. (2009). Sourdough in gluten-free bread-making: An ancient technology to solve a novel issue. *Food Microbiology*, 26(7), 676-684.
- Mudgil, D., Barak, S., y Khatkar, B. S. (July 1, 2016b). Optimization of bread firmness, specific loaf volume and sensory acceptability of bread with soluble fiber and different water levels. *Journal of Cereal Science*, 70, 186-191.
- Mudgil, D., Barak, S., y Khatkar, B. S. (2016a). Optimization of textural properties of noodles with soluble fiber, dough mixing time and different water levels. *Journal of Cereal Science*, 69, 104-110.
- Mujica-Sánchez, A.; Berti Díaz, M. 1(997). El cultivo del amaranto (*Amaranthus* spp.): producción, mejoramiento genético y utilización. Cultivos Andinos FAO. Oficial Regional de Producción Vegetal. FAO.
- Muñoz, (2015). Recuperado de <https://consejonutricion.wordpress.com/2015/08/03/el-grano-de-arroz-y-su-composicion-nutricional/>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., Vining, G. G., Borrer, C. M., y Kowalski, S. M. (2004). Response Surface Methodology: A Retrospective and Literature Survey. *Journal of Quality Technology*, 36(1), 53-77.
- Nieto-Nieto, T. V., Wang, Y. X., Ozimek, L., y Chen, L. (2015). Inulin at low concentrations significantly improves the gelling properties of oat protein – A molecular mechanism study. *Food Hydrocolloids*, 50, 116-127.
- Nkhabutlane, P., du Rand, G. E., y de Kock, H. L. (2014). Quality characterization of wheat, maize and sorghum steamed breads from Lesotho. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(10), 2104-2117.
- Noor, A. I., Mokhtar, M. H., Rafiqul, Z. K., y Pramod, K. M. (2012). Understanding Color Models: A Review. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2(3), 265– 275.
- Novoa, D. F., y Ramírez Navas, J. S. (2012). Caracterización colorimétrica del manjar blanco del Valle. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 54–61.
- Nyman, M. (2002). Fermentation and bulking capacity of indigestible carbohydrates: the case of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S163.

- O'Brien, C. M., Mueller, A., Scannell, A. G. M., y Arendt, E. K. (2003). Evaluation of the effects of fat replacers on the quality of wheat bread. *Journal of Food Engineering*, 56(2), 265-267.
- Oszvald, M., Tamás, C., Rakszegi, M., Tömösközi, S., Békés, F., y Tamás, L. (2009). Effects of incorporated amaranth albumins on the functional properties of wheat dough. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(5), 882-889.
- Oyarzábal, I. S., Ritsema, T., y Pearce, S. R. (2009). Analysis and Characterization of Fructan Oligosaccharides and Enzymatic Activities in the Leaves of *Agave tequilana* (Weber) var. 'Azul', (1), 12.
- Palazzo A.B., Carvalho M.A.R., Efraim P., y Bolini H.M.A. (2011). The determination of isosweetness concentrations of sucralose, rebaudioside and neotame as sucrose substitutes in new diet chocolate formulations using the time-intensity analysis. *Journal of Sensory Studies*, 26(4), 291-297.
- Paseephol, T., Small, D. M., y Sherkat, F. (2008). Rheology and texture of set yogurt as affected by inulin addition. *Journal of Texture Studies*, 39(6), 617-634.
- Pavis, N., Chatterton, N. J., Harrison, P. A., Baumgartner, S., Praznik, W., Boucaud, J., y Prud'homme, M. P. (2001a). Structure of fructans in roots and leaf tissues of *Lolium perenne*. *New Phytologist*, 150(1), 83-95.
- Penella, J. M. S., Ramos, J. A. T., Herranz, Y. S., y Haros, M. (2008). Mejora nutricional del pan integral. Molinería y panadería: *Revista profesional de panadería y pastelería*, (1179), 16-21.
- Peralta, E. (2009). *Amaranto y Ataco. Preguntas y Respuestas* (Tecnigrava). Quito.
- Peressini, D., y Sensidoni, A. (2009). Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs. *Journal of Cereal Science*, 49(2), 190-201.
- Piñero, M. P., Parra, K., Huerta-Leidenz, N., Arenas de Moreno, L., Ferrer, M., Araujo, S., y Barboza, Y. (2008). Effect of oat's soluble fibre (β -glucan) as a fat replacer on physical, chemical, microbiological and sensory properties of low-fat beef patties. *Meat Science*, 80(3), 675-680.
- Porr, M., y Alegre, E. P. (2012). El amaranto – pequeñas semillas con fuerzas colosales, 12.
- Psimouli, V., y Oreopoulou, V. (2013). The Effect of Fat Replacers on Batter and Cake Properties. *Journal of Food Science*, 78(10), C1495-C1502.
- Pulido, H. G., y Salazar, R. de la V. (2008). Análisis y diseño de experimentos, (Segunda edición), 564.

- Rai, S., Kaur, A., y Singh, B. (2014). Quality characteristics of gluten free cookies prepared from different flour combinations. *Journal of Food Science and Technology*, 51(4), 785-789.
- Rastogi, A., y Shukla, S. (2013). Amaranth: A New Millennium Crop of Nutraceutical Values. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(2), 109-125.
- Ratnavathi, C. V., y Patil, J. V. (2013). Sorghum Utilization as Food. *Nutrition & Food Sciences*, 4(1), 1-8.
- Ritsema, T., y Smeekens, S. (2003). Fructans: beneficial for plants and humans. *Current opinion in plant biology*, 6(3), 223-230.
- Roberfroid, M. B. (2000). Prebiotics and probiotics: are they functional foods? *The American Journal of Clinical Nutrition*, 71(6 Suppl), 1682S-7S; discussion 1688S-90S.
- Roberfroid, Marcel B. (1999). Concepts in Functional Foods: The Case of Inulin and Oligofructose. *The Journal of Nutrition*, 129(7), 1398S-1401S.
- Roberfroid, Marcel B. (2001). Prebiotics: preferential substrates for specific germs? *The American Journal of Clinical Nutrition*, 73(2), 406s-409s.
- Roberfroid, Marcel B. (2002). Functional foods: concepts and application to inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S139.
- Roberfroid, Marcel B. (2005a). Introducing inulin-type fructans. *British Journal of Nutrition*, 93(S1), S13.
- Roberfroid, Marcel B. (2007). Inulin-Type Fructans: Functional Food Ingredients 1,2, 10.
- Rodríguez Furlán, L. T., Padilla, A. P., y Campderrós, M. E. (2014). Development of reduced fat minced meats using inulin and bovine plasma proteins as fat replacers. *Meat Science*, 96(2, Part A), 762-768.
- Rodríguez, R., Jiménez, A., Fernández-Bolaños, J., Guillén, R., y Heredia, A. (2006). Dietary fibre from vegetable products as source of functional ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 17(1), 3-15.
- Rodríguez-García, J., Sahi, S. S., y Hernando, I. (2014). Functionality of lipase and emulsifiers in low-fat cakes with inulin. *LWT - Food Science and Technology*, 58(1), 173-182.
- Rodríguez-García, J., Salvador, A., y Hernando, I. (2014a). Replacing fat and sugar with inulin in cakes: bubble size distribution, physical and sensory properties. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 964-974.

- Rodríguez-García, J., Puig, A., Salvador, A., y Hernando, I. (2012). Optimization of a sponge cake formulation with inulin as fat replacer: structure, physicochemical, and sensory properties. *Journal of Food Science*, 77(2), C189-C197.
- Ronda, F., Gómez, M., Blanco, C. A., y Caballero, P. A. (2005). Effects of polyols and nondigestible oligosaccharides on the quality of sugar-free sponge cakes. *Food Chemistry*, 90(4), 549-555.
- Röbke, C., Ktenioudaki, A., y Gallagher, E. (2011). Inulin and oligofructose as fat and sugar substitutes in quick breads (scones): a mixture design approach. *European Food Research and Technology*, 233(1), 167.
- Rumessen, J. J., Bodé, S., Hamberg, O., y Gudmand-Høyer, E. (1990). Fructans of Jerusalem artichokes: intestinal transport, absorption, fermentation, and influence on blood glucose, insulin, and C-peptide responses in healthy subjects. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 52(4), 675-681.
- Rosell, C. M., Brites, C. M., Pérez, E., y Gularte, M. (2007). Arroz. De tales panes tales harinas". León, AE y Rosell, CM (Eds), Hugo Báez (Editorial) Córdoba (Argentina), Cap, 3, 123-160.
- SAGARPA, 2016. Recuperado de <https://www.gob.mx/sagarpa/en/articulos/sorgo-y-tierra-caliente-produccion-segura>
- Sanders, M. E., Guarner, F., Guerrant, R., Holt, P. R., Quigley, E. M., Sartor, R. B. y Mayer, E. A. (2013). An update on the use and investigation of probiotics in health and disease. *Gut*, 62(5), 787-796.
- Sangameswaran, B., y Jayakar, B. (2008). Anti-diabetic, anti-hyperlipidemic and spermatogenic effects of *Amaranthus spinosus* Linn. on streptozotocin-induced diabetic rats. *Journal of Natural Medicines*, 62(1), 79-82.
- Santiago-García, P. A., Mellado-Mojica, E., León-Martínez, F. M., y López, M. G. (2017). Evaluation of Agave angustifolia fructans as fat replacer in the cookies manufacture. *LWT-Food Science and Technology*, 77, 100-109.
- Sanz Penella, J. M., Collar, C., y Haros, M. (2008a). Effect of wheat bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread. *Journal of Cereal Science*, 48(3), 715-721.
- Sanz-Penella, J. M., Wronkowska, M., Soral-Smietana, M., y Haros, M. (2013). Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT - Food Science and Technology*, 50(2), 679-685.
- Sanz-Penella, Juan Mario, Tamayo-Ramos, J. A., Sanz, Y., y Haros, M. (2009). Phytate Reduction in Bran-Enriched Bread by Phytase-Producing Bifidobacteria. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), 10239-10244.

- Sapone, A., Bai, J. C., Ciacci, C., Dolinsek, J., Green, P. H., Hadjivassiliou, M. y Fasano, A. (2012). Spectrum of gluten-related disorders: consensus on new nomenclature and classification. *BMC Medicine*, 10(1).
- Sarwar, H. (2013). The importance of cereals (Poaceae: Gramineae) nutrition in human health: A review. *Journal of Cereals and Oilseeds*, 4(3), 32-35.
- Sauer, J. D. (1967). The Grain Amaranths and their relatives: A revised taxonomic and geographic survey. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 54(2), 103- 137.
- Schuppan, D., Dennis, M. D., y Kelly, C. P. (2005). Celiac disease: Epidemiology, pathogenesis, diagnosis, and nutritional management. *Nutr Clin Care*, 8(2), 16.
- Segura, M. E. M., y Rosell, C. M. (2011). Chemical composition and starch digestibility of different gluten-free breads. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(3), 224.
- Shah, A. B., Jones, G. P., y Vasiljevic, T. (2010). Sucrose-free chocolate sweetened with Stevia rebaudiana extract and containing different bulking agents—effects on physicochemical and sensory properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(7), 1426-1435.
- Shepherd S. J., y Gibson P. R. (2012). Nutritional inadequacies of the gluten-free diet in both recently-diagnosed and long-term patients with coeliac disease. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 26(4), 349-358.
- Stefoska-Needham, A., Beck, E. J., Johnson, S. K., y Tapsell, L. C. (2015). Sorghum: an underutilized cereal whole grain with the potential to assist in the prevention of chronic disease. *Food Reviews International*, 31(4), 401-437.
- Suzuki, M., y Chatterton, N. J. (1993). *Science and Technology of Fructans*. CRC Press.
- Szczesniak, A. S. (1963). Classification of Textural Characteristics a. *Journal of Food Science*, 28(4), 385-389.
- Tarini, J., y Wolever, T. M. S. (2010). The fermentable fibre inulin increases postprandial serum short-chain fatty acids and reduces free-fatty acids and ghrelin in healthy subjects. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 35(1), 9-16.
- Tárrega, A., y Costell, E. (2006). Effect of inulin addition on rheological and sensory properties of fat-free starch-based dairy desserts. *International Dairy Journal*, 16(9), 1104-1112.
- Tárrega, A., Rocafull, A., y Costell, E. (2010). Effect of blends of short and long-chain inulin on the rheological and sensory properties of prebiotic low-fat custards. *LWT-Food Science and Technology*, 43(3), 556-562.

- Taylor, J. R., Schober, T. J., y Bean, S. R. (2006). Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 252-271.
- Tientam, N., Khempaka, S., Paengkoum, P., y Boonanuntanasarn, S. (2015). Effects of inulin and Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) as prebiotic ingredients in the diet of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Animal Feed Science and Technology*, 207, 120-129.
- Torró, I. T. (2011). Análisis de los factores que determinan la resistencia al encamado y características de grano en arroz (*Oryza sativa* L.), y su asociación con otros caracteres, en varias poblaciones y ambientes: bases genéticas y QTLs implicados (Doctoral dissertation).
- Tungland, B. C., y Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo- and polysaccharides (dietary fiber): their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1(3), 90-109.
- Turabi, E., Sumnu, G., y Sahin, S. (2010). Quantitative analysis of macro and micro-structure of gluten-free rice cakes containing different types of gums baked in different ovens. *Food Hydrocolloids*, 24(8), 755-762.
- Turner, N. D., y Lupton, J. R. (2011). Dietary Fiber¹. *Advances in Nutrition*, 2(2), 151-152.
- Ulloa, D. J. A., Andrews, D. H. E., Gladis, Q. F. B., y Rodríguez, K. C. (2010). Los fructanos y su papel en la promoción de la salud, (5), 6.
- Valencia García, F. E. V., Millán Cardona, L. de J., y Ramirez Herrera, N. (2008). Evaluación de los efectos en las propiedades fisicoquímicas, sensoriales y texturales de povidex, fructosa y sorbitol como sustitutos de azúcar en la elaboración de arequipe. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(2), 8.
- Vaughan, D. A., Morishima, H., y Kadowaki, K. (2003). Diversity in the *Oryza* genus. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(2), 139-146.
- Vijn, I., y Smeekens, S. (1999). Fructan: ¿more than a reserve carbohydrate? *Plant Physiology*, 120(2), 351-360.
- Villegas, B., Tárrega, A., Carbonell, I., y Costell, E. (2010). Optimising acceptability of new prebiotic low-fat milk beverages. *Food Quality and Preference*, 21(2), 234-242.
- Wang, J., Rosell, C. M., y Benedito de Barber, C. (2002). Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. *Food Chemistry*, 79(2), 221-226.
- Wang, R., Zhou, W., y Isabelle, M. (2007). Comparison study of the effect of green tea extract (GTE) on the quality of bread by instrumental analysis and sensory evaluation. *Food Research International*, 40(4), 470-479.

- Jun-Zhi, W., Chatterton, N. J., Harrison, P. A., Wang, R. R., y Larson, S. R. (2002). Characterization of fructan biosynthesis in big bluegrass (*Poa secunda*). *Journal of Plant Physiology*, 159(7), 705.
- Weng *et al.*, 2001. Recuperado de <https://www.ajas.info/upload/pdf/14-219.pdf>
- WGO Practice Guideline. Probiotics and prebiotics, 2011.pdf.
- Wiele, T. V. D., Boon, N., Possemiers, S., Jacobs, H., y Verstraete, W. (2007). Inulin-type fructans of longer degree of polymerization exert more pronounced in vitro prebiotic effects. *Journal of Applied Microbiology*, 102(2), 452-460.
- Williams, C. M., y Jackson, K. G. (2002). Inulin and oligofructose: effects on lipid metabolism from human studies. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S261-S264.
- Wong, J. M. W., de Souza, R., Kendall, C. W. C., Emam, A., y Jenkins, D. J. A. (2006). Colonic Health: Fermentation and Short Chain Fatty Acids. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 40(3), 235.
- Wu, D., y Sun, D.-W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 5–20.
- Yousif, A., Nhepera, D., y Johnson, S. (2012). Influence of sorghum flour addition on flat bread in vitro starch digestibility, antioxidant capacity and consumer acceptability. *Food Chemistry*, 134(2), 880-887.
- Zahn, S., Pepke, F., y Rohm, H. (2010). Effect of inulin as a fat replacer on texture and sensory properties of muffins. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(12), 2531-2537.
- Zamora-Gasga, V. M., Bello-Pérez, L. A., Ortíz-Basurto, R. I., Tovar, J., y Sáyago-Ayerdi, S. G. (2014). Granola bars prepared with *Agave tequilana* ingredients: Chemical composition and in vitro starch hydrolysis. *LWT - Food Science and Technology*, 56(2), 309-314.
- Zapotoczny, P.; Markowski, M.; Majewska, K.; Ratajski, A.; Henryk, K. (2006). Effect of temperature on the physical, functional, and mechanical characteristics of hot-air-puffed amaranth seeds. *Journal of Food Engineering*. 76:469-476.
- Zaragoza, M. E. P. (2016). Universitat Politècnica de València. *Ingeniería del agua*, 18(1), ix.
- Zbikowska, A., y Rutkowska, J. (2008). Possibility of partial replacement of fat by inuline in cookies in order to decrease their caloric value. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 58(1).
- Zimeri, J. E., y Kokini, J. L. (2002). The effect of moisture content on the crystallinity and glass transition temperature of inulin. *Carbohydrate Polymers*, 48(3), 299-304.

- Zoetendal, E. G., Vaughan, E. E., y Vos, W. M. D. (2006). A microbial world within us. *Molecular Microbiology*, 59(6), 1639-1650.
- Zoulias, E. I., Oreopoulou, V., y Kounalaki, E. (2002). Effect of fat and sugar replacement on cookie properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(14), 1637-1644.
- Zumarán, O. R., y Yglesias, L. A. (2013). Optimización de las propiedades físicas, nutritivas y sensoriales del pan elaborado con harina de espárrago, kiwicha y trigo. *Revista Ciencia y Tecnología*, 9(3), 23-34.