



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL E INGENIERÍA
EN ALIMENTOS

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGROINDUSTRIAL

**Efecto de la sustitución de harina de trigo por harina de
leguminosas y mezcla de cereales en las propiedades
fisicoquímicas, texturales y sensoriales de donas**

PRESENTA

Guerrero López Letzi

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Antonio de Jesús Cenobio Galindo

Co-director:

Dr. Uriel González Lemus

Asesores:

Mtra. Denis de Jesús Dimas López

Dra. Iridiam Hernández Soto

Mtro. Rubén Adalberto Saucedo Licona



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Academic Area of Agroindustrial engineering and Food Engineering

Tulancingo de Bravo, Hidalgo., a 11 de mayo de 2026

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la pasante de Licenciatura en Ingeniería Agroindustrial, **Letzi Guerrero López**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“Efecto de la sustitución de harina de trigo por harina de leguminosas y mezcla de cereales en las propiedades fisicoquímicas, texturales y sensoriales de donas”**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

Dr. Antonio de Jesus Cenobio Galindo

Dr. Uriel González Lemus

Dra. Iridiam Hernández Soto

Mtra. Denis de Jesus Dimas López

Mtro. Rubén Adalberto Saucedo Licona

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Dr. Yair Oloyaldo Santiago Sáenz
Coordinador de la Licenciatura en
Ingeniería Agroindustrial



Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
Tulantepec, C.P. 43775, Hidalgo, Mexico.
Teléfono: 7717172000 Ext. 42021
ricardo_navarro@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



AGRADECIMIENTOS

Detrás de cada página de esta tesis, existen incontables horas de dedicación y el respaldo incondicional de personas extraordinarias. Por ello, deseo expresar mi más profunda gratitud, en primer lugar, a mi familia, quienes han sido el cimiento de este proyecto.

A mis padres, por ser los pilares fundamentales de mi vida. Gracias por sus consejos, por creer en mis sueños incluso antes que yo misma y por el sacrificio constante que realizaron para que hoy pueda alcanzar esta meta; este título es, en gran medida, el fruto de su esfuerzo. A mis abuelos, por sus palabras de aliento, su sabiduría y ese amor incondicional que siempre me ha brindado paz; su ejemplo de vida es la mejor herencia que he recibido.

A mi esposo, por ser mi compañero de vida y mi apoyo inquebrantable. Gracias por tu paciencia durante las largas jornadas de estudio, por tu comprensión y por caminar a mi lado en este proyecto que hoy vemos materializado. A mi hermana, por su alegría y por estar siempre presente, recordándome la importancia de seguir adelante; gracias por tu apoyo y por compartir conmigo cada triunfo.

A mi hijo Gael, mi mayor motor y mi más grande inspiración. Todo el esfuerzo dedicado a este trabajo tiene como fin construir para ti un mejor futuro y demostrarte que, con disciplina y amor, no hay meta que no se pueda alcanzar. Eres la razón de cada uno de mis pasos.

De manera especial, quiero agradecer a mi amigo Ángel, con quien tuve el honor de compartir esta carrera. Gracias por tu apoyo constante a lo largo de estos cinco años, por las jornadas de estudio compartidas y por ser un respaldo fundamental en cada etapa de nuestro camino universitario. Tu amistad hizo este trayecto mucho más valioso.

En el ámbito académico, extiendo mi agradecimiento a mi asesor de tesis, por su paciencia, sus valiosas correcciones y por guiarme con su experiencia en el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por brindarme el espacio y las herramientas necesarias para mi formación profesional.

Finalmente, gracias a todas las personas que, de manera directa o indirecta, aportaron sus conocimientos y apoyo para que este proyecto fuera una realidad.

DEDICATORIAS

A mis padres, por ser el origen de mis sueños, el pilar de mi vida y el ejemplo de esfuerzo que hoy me permite alcanzar esta meta.

A mis abuelos, por su amor eterno, su sabiduría y las enseñanzas que guardo en el corazón.

A mi esposo, mi compañero de vida y mi apoyo inquebrantable; gracias por caminar a mi lado en cada paso de este trayecto, por tu paciencia infinita y por ser el refugio donde siempre encontré la fuerza para continuar. Este logro también te pertenece.

A mi hermana, por su presencia constante y por compartir conmigo cada triunfo en este camino.

Y muy especialmente a mi hijo, Gael: que este logro sea la prueba de que el amor y la perseverancia pueden alcanzar cualquier meta. Eres mi luz, mi mayor motor y la razón de cada uno de mis pasos.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1.INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANTECEDENTES.....	5
3. MARCO TEÓRICO.....	7
3.1. La Enfermedad Celíaca.....	7
3.2 Gluten.....	7
3.2.1 Fuentes principales del gluten.....	8
3.3 Tratamiento de la enfermedad celíaca.....	8
3.4 Origen del Pan en México.....	8
3.5 Características del Pan.....	9
3.5.1 Características sensoriales del pan.....	9
3.6 Consumo de Pan a Nivel Mundial y Nacional.....	10
3.6.1. Consumo mundial.....	10
3.6.2. Consumo nacional.....	11
3.7 Tipos de Pan.....	11
3.7.1. Por fermentación.....	11
3.7.2. Por composición.....	12
3.8 La Dona (Donut).....	12
3.8.1. Variedades.....	12
3.9 Ingredientes convencionales para las donas.....	13
3.9.1. Harina de Trigo.....	13
3.9.2. Azúcar.....	13
3.9.3. Levadura.....	14
3.9.4. Grasas.....	14
3.9.5. Huevo.....	14
3.9.6. Harina de arroz.....	15
3.9.7. Harina de maíz.....	15
3.10 El Chícharo (<i>Pisum sativum</i>).....	15
3.10.1 Descripción botánica.....	15
3.10.2 Valor Nutricional.....	16
3.11. Harina de Chícharo.....	17
3.11.1 Proceso de secado y molienda del chícharo.....	17

4.JUSTIFICACIÓN	18
5.HIPÓTESIS.....	19
6. OBJETIVO GENERAL	19
6.1. Objetivos específicos.....	19
7. MATERIALES Y METÓDO	20
7.1 Materiales.....	20
7.1.1 Agentes Estructurales y Harinas Base	20
7.1.2 Ingredientes Líquidos y Emulsificantes	20
7.1.3 Agentes Leudantes y Aditivos Saborizantes.....	20
7.2 Método de elaboración	21
7.2.1 Preparación de la mezcla y homogeneización	21
7.2.2 Proceso de Cocción y Control Térmico	22
7.2.3 Estabilización Post-Cocción	24
7.3. Análisis químico proximal	24
7.3.1. Determinación de humedad	24
7.3.2. Contenido de ceniza	24
7.3.3. Cuantificación de proteína.....	25
7.3.4. Determinación de extracto etéreo	26
7.3.5. Determinación de fibra	26
7.4. Determinación de parámetros.....	27
7.5. Diseño experimental.....	28
8.RESULTADOS.....	28
8.1. Elaboración de las donas según su formulación.....	28
8.2 Formulación de las donas según su porcentaje de harina.	29
8.3. Análisis químico proximales.....	31
8.3.1. Humedad	31
8.3.2. Cenizas	32
8.3.3. Extracto etéreo.....	34
8.3.4. Proteína	35
8.3.5. Fibra.....	37
8.4. Color.....	39
8.4.1 Evaluación de los Parámetros de Color (L^* , a^* , b^*)	39
8.5. Evaluación sensorial mediante la Prueba de Kramer.....	40
9.CONCLUSIÓN.....	42
10. REFERENCIAS	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparativa histopatológica de la mucosa intestinal: vellosidades normales vs. atrofia por enfermedad celíaca.....	7
Figura 2. Morfología general de la planta de chícharo (<i>Pisum sativum</i>) y detalle de la flor...	16
Figura 3. Diagrama de proceso para la preparación y homogeneización de la masa a base de harina de <i>Pisum sativum</i>	21
Figura 4. Aspecto visual de las diferentes formulaciones de mini donas horneadas: (A) Formulación 65%, (B) Formulación 80% y (C) Formulación 25%.	29
Figura 5. Análisis visual de la corteza y la miga en donas experimentales con diferentes concentraciones de harina de chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	30
Figura 6. Comparación del porcentaje de humedad en diferentes formulaciones de harina de chícharo frente al testigo.....	31
Figura 7. Efecto de la sustitución de harina de trigo por harina de chícharo en el contenido de cenizas de donas	33
Figura 8. Comparativa del contenido graso en formulaciones de donas con harina de chícharo y muestra testigo.	34
Figura 9. Contenido de proteína en formulaciones de donas con diferentes porcentajes de harina de chícharo.	36
Figura 10. Comparativa del contenido graso en formulaciones de donas con harina de chícharo y muestra testigo.	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición de las formulaciones del diseño experimental y tratamiento testigo ..	22
Tabla 2. Efecto del porcentaje de sustitución de harina de chícharo (<i>Pisum sativum</i>) sobre las coordenadas colorimétricas (L^* , a^* , b^*) del producto formulado.....	40
Tabla 3. Sumas de rangos y significancia estadística de las formulaciones.	41

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar y evaluar una dona formulada con harina de chícharo (*Pisum sativum*) como una alternativa reducida en azúcares, orientada a satisfacer las necesidades nutricionales y sensoriales de consumidores intolerantes al gluten. Para ello, se analizó el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina de chícharo sobre las características bromatológicas, colorimétricas y sensoriales del producto. Se emplearon tres niveles de sustitución (25%, 65% y 80%) comparados con un tratamiento testigo. El análisis químico proximal demostró que la incorporación de *P. sativum* incrementa significativamente el valor nutricional; la formulación al 80% alcanzó un 11.01% de proteína (superando en un 50.2% al testigo) y aportó un contenido de fibra dietética promedio del 5.2%. En el aspecto físico químico, se observó que a mayor sustitución disminuye la humedad, registrando un mínimo de 36.00% en el nivel del 80%, mientras que la absorción de lípidos se incrementó a un 10% frente al 1.76% del control. La caracterización colorimétrica (CIELAB) indicó que la luminosidad (L^*) se mantuvo estable, aunque con reducciones en las coordenadas a^* y b^* . Finalmente, la prueba sensorial de Kramer con 50 jueces determinó una preferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) por la formulación al 65%, mientras que el nivel del 80% fue rechazado. Se concluye que la sustitución al 65% representa el punto óptimo que cumple con la demanda de un alimento saludable y sensorialmente aceptable para el segmento de mercado objetivo.

Palabras clave: *Pisum sativum*, gluten-free, análisis bromatológico, prueba de Kramer, alimentos funcionales.

ABSTRACT

The objective of this study was to develop and evaluate a donut formulated with pea flour (*Pisum sativum*) as a reduced-sugar alternative, aimed at meeting the nutritional and sensory needs of gluten-intolerant consumers. The effect of partial wheat flour substitution with legume flour on the bromatological, colorimetric, and sensory characteristics of baked donuts was analyzed. Three substitution levels (25%, 65%, and 80%) were developed and compared with a control treatment. Proximal chemical analysis showed that the incorporation of legume flour significantly increases the nutritional value; the 80% treatment reached 11.01% protein (exceeding the control by 50.2%) and provided an average dietary fiber content of 5.2%. From a physicochemical standpoint, higher substitution levels led to a decrease in moisture, reaching a minimum of 36.00% in the 80% sample, while lipid absorption increased to 10% compared to 1.76% in the control. Colorimetric characterization (CIELAB) indicated that lightness (L*) remained stable, although reductions in a* and b* coordinates were observed. Finally, the Kramer sensory test with 50 judges determined a statistically significant preference ($p < 0.05$) for the 65% formulation, while the 80% level was rejected. It is concluded that the 65% substitution represents the optimal point that meets the demand for a functional, healthy, and sensorially acceptable food for the target market segment.

Keywords: *Pisum sativum*, gluten-free, bromatological analysis, Kramer test, functional foods.

1.INTRODUCCIÓN

La enfermedad celíaca (EC) se define en la actualidad como un trastorno sistémico de base inmunológica, desencadenado por la ingesta de gluten y prolaminas relacionadas presentes en el trigo, la cebada, el centeno y sus híbridos en individuos genéticamente susceptibles (Posner & Haseeb, 2025). La exposición a estos péptidos inmunogénicos provoca una compleja respuesta inflamatoria en la mucosa intestinal, caracterizada histológicamente por la hiperplasia de las criptas y la atrofia de las vellosidades. Este daño altera drásticamente la permeabilidad del intestino y reduce de forma crítica la capacidad de absorción de nutrientes esenciales (Angulo-Pichardo et al., 2024). Aunque en los últimos años se han investigado enfoques farmacológicos no dietéticos, hasta el momento el único tratamiento clínico validado, seguro y eficaz sigue siendo la exclusión estricta y de por vida a través de una dieta libre de gluten (DLG), la cual es fundamental para lograr la recuperación de la mucosa y evitar complicaciones a largo plazo (Flores Méndez & Coronel Rodríguez, 2024).

En este contexto, la industria alimentaria enfrenta el desafío constante de formular productos que respondan a estas restricciones médicas sin sacrificar la calidad nutricional ni sensorial. El pan y sus derivados, al ser alimentos básicos y de alto consumo a nivel mundial, representan un reto particular. En México, el consumo de productos de panificación basados en harina de trigo es culturalmente elevado; sin embargo, la oferta de sustitutos adecuados, seguros y nutricionalmente densos para la población con celiacía sigue siendo limitada. Si bien ingredientes como la linaza, la maca y el yacón han cobrado relevancia como alternativas funcionales, el uso de leguminosas destaca por su viabilidad tecnológica y su aporte nutricional.

Ante esta necesidad, la sustitución de la harina de trigo por harina de chícharo (*Pisum sativum*) emerge como una alternativa prometedora. Esta leguminosa no solo es naturalmente libre de gluten, sino que posee un perfil proteico destacado, rico en aminoácidos esenciales como la lisina, la arginina y aminoácidos de cadena ramificada (BCAAs), fundamentales para el metabolismo muscular. Asimismo, su bajo índice glucémico proporciona beneficios adicionales para consumidores con alteraciones metabólicas, ampliando el espectro de impacto de este ingrediente.

No obstante, la reformulación de productos horneados libres de gluten implica desafíos sensoriales y tecnofuncionales críticos. El color es uno de los principales parámetros de aceptabilidad para el consumidor y depende directamente del índice de oscurecimiento generado por la reacción de Maillard (interacción entre azúcares reductores y aminoácidos) durante el horneado (Olahanmi et al., 2023). Debido a que la harina de chícharo modifica la concentración de estos precursores, resulta imperativo evaluar su impacto en las características reológicas y en la calidad sensorial final del producto.

Por lo anterior, el presente trabajo de investigación se centra en el aprovechamiento de las propiedades tecnofuncionales del chícharo. El objetivo general es desarrollar y

evaluar bromatológica y sensorialmente una dona formulada con harina de chícharo, presentándola como una alternativa frente a la dona convencional caracterizada por un alto índice glucémico, alérgenos como el gluten y un elevado aporte de azúcares refinados. Esta propuesta está orientada a satisfacer las necesidades de consumidores intolerantes al gluten y de aquellos que buscan opciones alimentarias con un mejor perfil metabólico gracias al mayor aporte de proteína y fibra intrínsecos de la leguminosa.

2. ANTECEDENTES

La utilización de leguminosas en la industria de la panificación ha ganado terreno debido a su capacidad para mejorar el perfil nutricional y funcional de los productos. En este contexto, Calvo Carrillo et al. (2020) evaluaron la sustitución de harina de trigo por harina de chícharo en niveles del 10 %, 15 % y 20 % en panes tipo baguette, analizando variables críticas como la pérdida de humedad, el volumen específico y el perfil de aminoácidos. Estos parámetros son fundamentales para entender cómo la densidad de la leguminosa altera la estructura física del pan.

Uno de los desafíos técnicos más importantes al trabajar con *Pisum sativum* es su perfil sensorial. Al respecto, el estudio de Wang et al. (2021) resulta fundamental, ya que demuestra que tratamientos térmicos optimizados (como el calentamiento por radiofrecuencia) en la harina permiten una eficiente inactivación de la enzima lipoxigenasa. Este proceso es clave para limitar la oxidación de lípidos, eliminar el característico sabor a legumbre cruda (*Beany flavor*) y mejorar significativamente la textura y aroma de la miga. Complementando esta visión técnica, Hoehnel et al. (2021) exploraron cómo las fracciones de proteína insoluble de las leguminosas interactúan con la red de la masa para aportar fuerza estructural, un factor determinante en la calidad final de panes fortificados.

Desde la perspectiva del consumidor, la aceptabilidad es el filtro definitivo para la innovación alimentaria. Kowalski et al. (2022) realizaron paneles sensoriales exhaustivos en productos de panificación enriquecidos con harinas de leguminosas alternativas, evaluando atributos clave como la apariencia, el sabor y la disposición de compra, confirmando que las formulaciones balanceadas no merman la percepción general del consumidor. Por otro lado, la aplicación de estas harinas en productos fritos, como las donas, ofrece ventajas adicionales; García-Bañuelos et al. (2021) señalan que las harinas de leguminosas actúan como una barrera física que reduce la absorción de aceite, mejorando simultáneamente el aporte proteico del producto.

Cuando el objetivo es desarrollar productos libres de gluten, la interacción entre ingredientes alternativos se vuelve aún más compleja. Reddy y Kumar (2023) establecieron bases sólidas al formular donas libres de gluten evaluando la incorporación de harinas como sorgo y trigo sarraceno, y analizando cómo estas determinan la retención de gas y el volumen final tras el freído. En este tipo de formulaciones, el uso de aditivos es casi obligatorio para replicar las propiedades del trigo.

En este sentido, Heredia-Sandoval et al. (2020) subrayan que la goma xantana es esencial para evitar que la dona resulte excesivamente densa y para asegurar que mantenga su forma circular sin colapsar durante la cocción. Finalmente, revisiones recientes como la de Silva et al. (2024) destacan que la inclusión sistemática de hidrocoloides (como la goma xantana y el HPMC) es vital para optimizar la sensación

en boca (*mouthfeel*) y retener el agua, factores críticos cuando se emplean harinas densas, como la de chícharo, que tienden a reseca la matriz alimentaria.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. La Enfermedad Celíaca

La celiacía o enfermedad celíaca es una afección autoinmune crónica que afecta principalmente al intestino delgado. Se caracteriza por una intolerancia permanente al gluten, un conjunto de proteínas presentes en el trigo, la avena, la cebada y el centeno (TACC) (National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, 2020). Al ingerir gluten, el sistema inmunitario de las personas predispuestas genéticamente reacciona dañando la mucosa del intestino, específicamente las vellosidades intestinales (**ver Figura 1**). Este daño altera la absorción de nutrientes esenciales, lo que puede derivar en complicaciones sistémicas si no se mantiene una dieta estrictamente libre de gluten de por vida (World Gastroenterology Organisation, 2018).

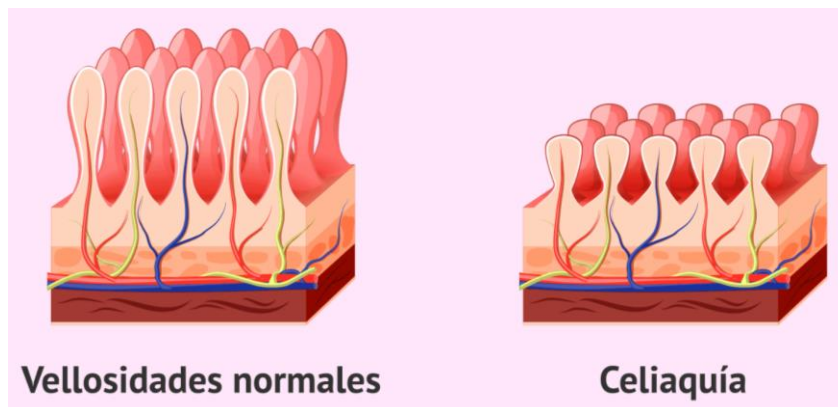


Figura 1. Comparativa histopatológica de la mucosa intestinal: vellosidades normales vs. atrofia por enfermedad celíaca. Nota. La imagen ilustra el proceso de aplanamiento de las vellosidades en un paciente con celiacía en comparación con un tejido sano. Tomado de Designua (s.f.).

3.2 Gluten

El gluten no es una proteína única, sino un complejo proteico que se encuentra en el endospermo de ciertos cereales. Está constituido principalmente por dos fracciones de proteínas: las gliadinas y las gluteninas. Las gliadinas representan la fracción soluble en alcohol y, además de contener las secuencias de aminoácidos responsables de desencadenar la respuesta inmunitaria en personas con enfermedad celíaca, son las encargadas de aportar viscosidad y extensibilidad a las masas panarias (Rottersman et al., 2025). Por otro lado, las gluteninas conforman la fracción insoluble de alto peso molecular que confiere fuerza, elasticidad y cohesión a la estructura del pan; estas propiedades reológicas son indispensables para que la masa logre retener el gas producido durante la fermentación, propiciando su expansión volumétrica (Abedi & Pourmohammadi, 2023). Cuando estas dos proteínas se

hidratan y se someten a trabajo mecánico, interactúan de forma sinérgica para formar la red tridimensional viscoelástica que se conoce técnicamente como matriz de gluten (Desale & Hayles, 2023).

3.2.1 Fuentes principales del gluten

El gluten está presente en una gran variedad de alimentos. Se encuentra de forma natural en cereales que contienen las proteínas gliadina y glutenina, tales como el trigo, la cebada, el centeno y el triticale. Cabe mencionar que el trigo abarca todas sus variedades, en la cebada incluye también a la malta, sin embargo, en el caso de la avena, sabemos que naturalmente es libre de gluten, pero debido a la contaminación cruzada en el cultivo llega a contener trazas de trigo (Celiac Disease Foundation, 2024).

3.3 Tratamiento de la enfermedad celíaca

De acuerdo con la World Gastroenterology Organisation (2024), el único tratamiento efectivo y científicamente aceptado para la enfermedad celíaca es el cumplimiento estricto de una dieta libre de gluten (DLG) de por vida. Esta intervención no es solo una recomendación nutricional, sino una necesidad terapéutica, dado que el alimento se convierte en el único medicamento capaz de revertir el daño histológico. Al respecto, Al-Toma et al., (2019) señalan que la eliminación total de proteínas derivadas del trigo, la cebada y el centeno es fundamental para lograr la remisión de los síntomas y la recuperación de la arquitectura de las vellosidades intestinales. La ausencia de fármacos curativos implica que cualquier transgresión dietética, incluso mínima, puede desencadenar una respuesta inmunitaria persistente, incrementando el riesgo de complicaciones a largo plazo como la osteoporosis, la anemia ferropénica y ciertos tipos de linfomas intestinales.

3.4 Origen del Pan en México

El origen del pan en México constituye un paradigma de transculturación alimentaria que inició en el siglo XVI tras la conquista española. Históricamente, la llegada del trigo a territorio mesoamericano se atribuye a Juan Garrido un conquistador de origen africano, frecuentemente referido en crónicas antiguas como esclavo de Hernán Cortés, quien halló tres granos de trigo mezclados en un costal de arroz y decidió sembrarlos, logrando así la primera cosecha de este cereal en tierras mexicanas (Sánchez Sánchez, 2020; Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo [UAEH], 2022).

La demanda de la población española por replicar la dieta y el estilo de vida que mantenían en Europa impulsó una rápida transformación tecnológica en la Nueva España. Para satisfacer la necesidad de harina a gran escala, se sustituyó paulatinamente el uso de utensilios de molienda tradicionales, como el metate y el

molcajete. En su lugar, los españoles establecieron molinos hidráulicos en las riberas de los ríos, lo que optimizó drásticamente la velocidad y el volumen del procesamiento del grano (UAEH, 2022). Esta transición no solo representó un avance técnico, sino el cimiento para una nueva industria alimentaria.

A diferencia de Europa, donde el pan mantenía un carácter predominantemente funcional, en México experimentó una evolución hacia una expresión estética, cultural y simbólica. La amalgama de las técnicas de fermentación europeas con ingredientes endémicos como el cacao y el piloncillo, así como el uso de fermentos locales como el pulque, sentaron las bases de la panadería nacional (Munsa, 2024).

Posteriormente, durante el siglo XIX, la intervención francesa introdujo nuevas metodologías y masas (como el *brioche*), que los panaderos mexicanos adaptaron magistralmente aportando su propio ingenio (Pardo, 2023). Según explica García (2021), esta fusión técnica y estética consolidó una cultura panadera única en el mundo, logrando que el pan dulce se transformara en un elemento esencial de la dieta, la identidad y las celebraciones cotidianas de los mexicanos.

3.5 Características del Pan

El pan se define como el producto resultante de la cocción de una mezcla de harina (generalmente de trigo), agua, sal y levadura. Su estructura depende fundamentalmente de la formación del gluten, una red proteica que retiene los gases durante la fermentación (Parenti et al., 2020)

Las propiedades organolépticas son aquellas características que percibimos a través de los sentidos (vista, olfato, gusto y tacto) y que determinan la calidad y la aceptación de un pan por parte del consumidor. Sin embargo, se evalúan más a detalle, la corteza y la miga están encargadas de ser evaluadas por la vista en el caso de la corteza debe presentar un color dorado al pardo rojizo, esto dando como resultado de la reacción de Maillard. (García & Martínez, 2021).

3.5.1 Características sensoriales del pan

El trigo (*Triticum aestivum*) es la piedra angular de la panificación tradicional gracias a su capacidad única para formar la red de gluten. Las gliadinas y gluteninas presentes en su composición son las encargadas de aportar la viscoelasticidad necesaria para retener el dióxido de carbono producido durante la fermentación. Al modificar una formulación base, la harina de trigo deja de ser solo un ingrediente estructural y se convierte en la variable principal que define el perfil reológico de la masa. Parámetros como el tiempo de desarrollo, la fuerza (N), la extensibilidad (mm)

y el volumen específico del pan dependen íntimamente de la integridad de esta matriz proteica (Padilla-Villalobos et al., 2024).

Al plantear la sustitución parcial de la harina de trigo por fuentes proteicas de origen vegetal particularmente leguminosas como el chícharo (*Pisum sativum*), se induce un efecto de dilución del gluten que altera profundamente tanto el comportamiento fisicoquímico como reológico del sistema. Físicamente, la incorporación de harinas de leguminosas modifica la capacidad de retención de agua, los perfiles de viscosidad y las dinámicas termodinámicas de empaste, debido a las diferencias estructurales de sus almidones y su alta carga proteica. Reológicamente, estas adiciones suelen traducirse en una disminución de la estabilidad de la masa y un incremento en su tenacidad (Olakanmi et al., 2022)

Asimismo, la inclusión de harina de chícharo no solo enriquece el perfil aminoacídico del producto, sino que influye en los procesos de fermentación y en la reticulación del gluten, factores determinantes en el Análisis de Perfil de Textura (TPA). Tecnológicamente, superar el umbral ideal de sustitución puede derivar en un pan con una estructura de miga más densa, menor volumen específico y un incremento notable en la dureza y masticabilidad (López Domínguez et al., 2025; Padilla-Villalobos et al., 2024). Por consiguiente, comprender esta estrecha correlación es imperativo para establecer un equilibrio en la formulación; un nivel de sustitución exacto permite capitalizar el enriquecimiento nutricional sin sacrificar las propiedades organolépticas ni la viabilidad tecnológica del pan.

3.6 Consumo de Pan a Nivel Mundial y Nacional

A nivel global, la industria de la panificación muestra una expansión sostenida impulsada por la urbanización y la demanda de alimentos funcionales (Cisneros-Tapia et al., 2024). Según estimaciones de crecimiento regional, la zona de Asia-Pacífico lidera la transición hacia modelos de comercio electrónico en el sector. En el contexto de México, la demanda se mantiene robusta con un consumo per cápita de 33 a 36 kilogramos anuales, donde el pan blanco (bolillos y teleras) domina el 81% del mercado nacional; no obstante, su alta densidad de sodio ha generado preocupaciones de salud pública que impulsan la búsqueda de alternativas (Brito et al., 2018; Nieto et al., 2024). En consecuencia, existe una transición notable hacia productos artesanales y de etiqueta limpia (*clean label*), sector que refleja una mayor conciencia por la salud y la transparencia en el uso de aditivos naturales en lugar de conservantes sintéticos (García-Sánchez et al., 2025; Pawłowska et al., 2024).

3.6.1. Consumo mundial

A nivel internacional, el pan se consolida como un pilar de la seguridad alimentaria y un motor económico de escala masiva. Según estimaciones de (Technavio, 2025), el mercado mundial de productos de panificación ha superado una valoración de 250 mil millones de dólares, impulsado por una tasa de crecimiento anual compuesta

(CAGR) del 3.8%. Este fenómeno no solo responde al aumento poblacional, sino a una diversificación de la demanda donde el consumidor moderno prioriza la conveniencia del pan industrializado en mercados emergentes, mientras que en economías desarrolladas existe un retorno hacia productos de etiqueta limpia (clean label) y fermentaciones naturales (Mordor Intelligence, 2026). La innovación en ingredientes funcionales y la reducción de sodio se presentan como las respuestas de la industria ante las regulaciones de salud pública globales.

3.6.2. Consumo nacional

El consumo de pan en México representa un pilar sociocultural con una ingesta promedio que alcanza los 33.5 kg per cápita (CANAINPA, 2023). No obstante, la industria enfrenta una reconfiguración debido a la fluctuación en los precios de los *commodities* agrícolas y costos energéticos (SIAP, 2024). Paralelamente, se observa una transición en el perfil de demanda hacia productos con mayor densidad de fibra y menor respuesta glucémica, alineándose con las recomendaciones nacionales de salud para la prevención de enfermedades metabólicas (Gaona-Pineda et al., 2023).

3.7 Tipos de Pan

La diversidad en los tipos de pan se puede categorizar principalmente por la presencia o ausencia de agentes leudantes y por el grano base utilizado. Existen los panes leudados, que dependen de la fermentación biológica (levadura comercial o masa madre) para generar dióxido de carbono y crear una estructura alveolar esponjosa, como la baguette o el pan de centeno; en contraste, los panes planos se elaboran sin este proceso de crecimiento significativo, resultando en productos más densos como el pan pita o las tortillas. Esta distinción es crucial en la ciencia de los alimentos, ya que, según Cappelli et al. (2020), la estructura final del pan no depende solo de los ingredientes, sino de la capacidad de las proteínas del gluten para formar una red elástica que retenga los gases producidos durante la fermentación, definiendo así la textura y el volumen del producto final.

3.7.1. Por fermentación

Existen dos tipos de pan: leudados y ázimos, la diferencia entre ambos es estructural y organoléptico, y es fundamentalmente en la actividad biológica dentro de la masa antes de la cocción. Los panes leudados incorporan levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) que fermentan los azúcares presentes, produciendo etanol y dióxido de carbono; este gas queda atrapado en la red de gluten, expandiendo el volumen y creando una textura alveolar y ligera. Por el contrario, los panes ázimos se elaboran sin agentes de fermentación, lo que impide el desarrollo de bolsas de aire significativas, resultando en productos planos, de miga compacta y con una vida útil generalmente más larga debido a su menor contenido de humedad. Tal como señalan Cauvain y Young (2022), el control de la expansión gaseosa es el parámetro

tecnológico crítico que separa la compleja reología de los productos fermentados de la simplicidad mecánica de las variedades sin levadura.

3.7.2. Por composición

La diferencia entre el pan salado y el pan dulce trasciende en el sabor, radicando principalmente en la proporción de ingredientes enriquecedores y la técnica de fermentación empleada. Mientras que los panes salados, como el bolillo o la baguette, se caracterizan por una formulación austera de harina, agua, sal y levadura para lograr una corteza crujiente y una miga aireada, los panes dulces (conchas, donas o cuernos) se clasifican como masas enriquecidas debido a sus altos niveles de grasas, azúcares y huevos. Esta adición de lípidos interfiere con el desarrollo del gluten, lo que resulta en una textura mucho más suave, tierna y densa. Según Timmermans et al. (2022), la presencia de azúcar en altas concentraciones no solo aporta dulzor, sino que actúa como un higroscópico que retiene la humedad y compite con la levadura por el agua, lo que requiere tiempos de fermentación más controlados para asegurar que la masa logre el volumen deseado a pesar de la carga de ingredientes pesados.

3.8 La Dona (Donut)

La dona se define como una pieza de repostería de alta palatabilidad elaborada a partir de una masa enriquecida, cuya característica distintiva es el método de cocción por inmersión en grasa caliente (típicamente entre 180 °C y 190 °C) en lugar del horneado convencional. Este producto posee una estructura alveolar fina y una miga sumamente tierna, logradas mediante una formulación con alto contenido de sacarosa, lípidos y agentes leudantes, ya sean químicos o biológicos. De acuerdo con Li y Zhang (2022), la rápida transferencia de calor durante la fritura profunda provoca la expansión inmediata de los gases y la formación de una costra externa porosa y dorada; esta corteza no solo define su perfil sensorial, sino que actúa como base para glaseados y coberturas que funcionan como barrera contra la pérdida de humedad. No obstante, Fang et al. (2021) enfatizan que el control de la temperatura del aceite es el factor crítico en este proceso, ya que una técnica inadecuada puede derivar en una absorción excesiva de grasa o en un centro crudo, comprometiendo tanto la calidad sensorial como el valor nutricional del producto final.

3.8.1. Variedades

Las diferencias entre la variedad de dona de anillo y la dona rellena (o berlinesa) radican principalmente en su morfología y en la etapa de finalizado tras la fritura. Mientras que la dona de anillo posee un orificio central diseñado para maximizar el área de superficie expuesta al calor y asegurar una cocción uniforme en toda la pieza, la dona rellena se presenta como un bollo sólido cuya cavidad interna se expande durante la fermentación, permitiendo la posterior inyección de cremas, mermeladas o chocolates. Según Li y Zhang (2022), aunque ambas variedades comparten una base de masa enriquecida y fermentada, la termodinámica de su cocción y su manejo post-

fritura difieren drásticamente; la topología de la dona de anillo favorece la adhesión superficial de glaseados o azúcares, mientras que la dona rellena requiere una red viscoelástica firme y una porosidad controlada en la miga para soportar la presión mecánica de rellenos densos sin comprometer la integridad estructural de la pieza.

3.9 Ingredientes convencionales para las donas

La formulación de las donas convencionales se basa en una masa enriquecida donde la sinergia entre sus ingredientes determina la calidad del producto final. Los componentes esenciales incluyen harina de trigo de fuerza media para desarrollar una red de gluten elástica, agua o leche como agentes de hidratación, y levadura biológica para la producción de gas. No obstante, lo que define a la dona es la incorporación de azúcares, grasas (mantequilla o manteca) y huevos, los cuales actúan como ablandadores de la miga y mejoradores del sabor. De acuerdo con Kim et al. (2024), la grasa cumple la función primordial de "acortar" las hebras de gluten al lubricar la matriz proteica, lo que resulta en una textura tierna y una mordida suave. En sinergia con esto, Timmermans et al. (2022) señalan que el azúcar no solo aporta dulzor, sino que favorece la reacción de Maillard durante la fritura, otorgando ese color dorado característico y asegurando una retención de humedad prolongada en el anaquel.

3.9.1. Harina de Trigo

La harina de trigo es el ingrediente fundamental en la panificación debido a su capacidad única para formar una red viscoelástica denominada gluten. Este complejo proteico se origina mediante la hidratación y el trabajo mecánico de dos proteínas principales: la glutenina, que aporta elasticidad y fuerza, y la gliadina, que otorga extensibilidad a la masa. En el proceso de elaboración de productos como las donas o el pan tradicional, esta red actúa como una barrera semipermeable que retiene los gases producidos por la fermentación o los agentes leudantes químicos. Según Pourmohammadi et al. (2023), la selección del tipo de harina es determinante, ya que el perfil y contenido de estas fracciones proteicas definen la capacidad de la masa para expandirse sin colapsar, estableciendo así la estructura final, el volumen y la textura de la miga del producto horneado o frito.

3.9.2. Azúcar

En el proceso de panificación, el azúcar (sacarosa) desempeña un rol multifuncional que trasciende el simple aporte de dulzor al producto final. Su función primordial es servir como la principal fuente de carbohidratos fermentables para la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*), la cual metaboliza estos azúcares para producir dióxido de carbono (CO₂) y etanol, permitiendo así el crecimiento y la aireación de la masa. Además de esta función biológica, Xie et al. (2023) señalan que el azúcar actúa como un agente ablandador al competir fuertemente con las proteínas de la harina por el agua libre (hidratación), lo que retrasa la conformación de la red viscoelástica del

gluten y deriva en una miga más tierna. Complementando este rol estructural, Çelik y Gökmen (2020) destacan que la presencia de azúcares en la superficie de la masa es el sustrato termodinámico esencial para desencadenar las reacciones de pardeamiento no enzimático —específicamente la reacción de Maillard y la caramelización— durante la cocción, siendo estas responsables de desarrollar el color dorado característico y los complejos perfiles aromáticos de la corteza.

3.9.3. Levadura

En el ámbito de la panificación, la levadura (específicamente la cepa *Saccharomyces cerevisiae*) actúa como el agente leudante biológico fundamental, cuya función metabólica es transformar los azúcares fermentables en dióxido de carbono (CO₂) y etanol. Este proceso, conocido como fermentación alcohólica, es el responsable de la expansión de la masa; el gas liberado queda atrapado dentro de la red de gluten, creando miles de pequeñas celdas de aire que otorgan al pan su volumen y su estructura esponjosa característica. Según Gisslen (2018), la levadura no solo cumple una función mecánica de inflado, sino que también desempeña un papel enzimático crucial al descomponer almidones complejos en azúcares simples, lo que contribuye significativamente al desarrollo de los precursores del aroma y el sabor complejo que distinguen al pan fermentado de otros productos de repostería.

3.9.4. Grasas

Las grasas desempeñan un papel fundamental en la panificación técnica, actuando no solo como conductores de sabor, sino también como agentes de textura que determinan la calidad del producto final. En la elaboración de donas, ingredientes como la mantequilla o la manteca intervienen en el proceso de acortamiento de las cadenas de gluten, lo que resulta en una miga mucho más tierna, suave y sedosa. Además, la grasa mejora la extensibilidad de la masa y actúa como un conservante natural al retener la humedad, prolongando la frescura del pan. Según explican Nawrocka et al. (2022), la presencia de lípidos asegura que la dona tenga esa sensación característica de deshacerse en la boca, diferenciándose de un pan de corteza dura, debido a que el recubrimiento lipídico interrumpe la formación excesiva de la matriz proteica y retrasa eficazmente la retrogradación del almidón.

3.9.5. Huevo

El huevo es un ingrediente vital en la elaboración de masas enriquecidas como las donas, debido a su capacidad única para proporcionar estructura y emulsión simultáneamente. Las proteínas del huevo coagulan durante la cocción, creando un andamiaje que sostiene el volumen y la forma de la dona, impidiendo su colapso tras la fritura. Además, como señalan Sun et al. (2020), la yema contiene lecitina, un potente emulsionante natural que permite la integración homogénea de las grasas y

el agua en la masa; esto resulta en una miga uniforme, suave y con mayor retención de humedad, características esenciales para la calidad del producto final.

3.9.6. Harina de arroz

La harina de arroz se ha consolidado como uno de los ingredientes alternativos más importantes en la panificación moderna, impulsada principalmente por la creciente demanda de productos libres de gluten. Destaca por su sabor neutro, su color blanco y su naturaleza hipoalergénica, lo que la hace ideal para formulaciones aptas para personas con enfermedad celíaca o sensibilidad al trigo (Kang et al., 2023). Sin embargo, su principal limitación técnica radica precisamente en la ausencia de las proteínas formadoras del gluten. En la panificación convencional, el gluten proporciona la red viscoelástica necesaria para retener los gases y dar estructura a la miga; al carecer de este componente, las masas elaboradas exclusivamente con harina de arroz tienden a ser poco cohesivas y producen panificados densos o fácilmente quebradizos (Siminiuc y Țurcanu, 2023)

3.9.7. Harina de maíz

La harina de maíz es un ingrediente fundamental en el desarrollo de productos de panificación libres de gluten debido a su gran accesibilidad, su perfil sensorial agradable y su alta concentración de almidón, el cual juega un papel crucial en la gelatinización y la estructuración del pan durante el horneado (Cappelli et al., 2020). No obstante, su principal limitación tecnológica es la ausencia de proteínas formadoras de gluten; sin esta red viscoelástica, las masas elaboradas únicamente con harina de maíz presentan una deficiente retención de los gases producidos por los agentes leudantes, lo que se traduce en panes de bajo volumen específico, con una textura densa y una miga altamente quebradiza (Santos et al., 2021).

3.10 El Chícharo (*Pisum sativum*)

El *Pisum sativum*, conocido comúnmente como chícharo o guisante, es una planta herbácea perteneciente a la familia de las leguminosas (Fabaceae) que ha desempeñado un papel fundamental en la agricultura desde su domesticación en el Cercano Oriente durante el periodo Neolítico (Pheirim et al., 2022). Esta especie se distingue por su alto perfil nutricional, ya que constituye una fuente esencial de proteínas vegetales, fibra dietética y micronutrientes, lo cual la posiciona como un cultivo estratégico para garantizar la seguridad alimentaria en diversas regiones del mundo (Rana et al., 2021). Adicionalmente, el cultivo de chícharo ofrece beneficios ecológicos significativos; gracias a su relación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium*, la planta tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, reduciendo así la necesidad de fertilizantes sintéticos y promoviendo la sostenibilidad del suelo (Kebede, 2021).

3.10.1 Descripción botánica

Se define como una planta herbácea anual perteneciente a la familia Fabaceae (anteriormente Leguminosae) y a la subfamilia Faboideae. Esta especie se caracteriza por poseer un sistema radicular profundo y tallos huecos y angulares que pueden desarrollar un hábito de crecimiento trepador o enano, dependiendo de la

variedad y las condiciones ambientales (Ge et al., 2020). Sus hojas son alternas y compuestas pinnadas, donde los folíolos terminales se han modificado evolutivamente en zarcillos filamentosos que permiten la sujeción de la planta a soportes naturales o artificiales. En cuanto a su estructura reproductiva, el chícharo presenta flores zigomorfas de tipo papilionáceo (con estandarte, alas y quilla), y su fruto constituye una legumbre típica: una vaina dehiscente que encierra una hilera variable de semillas globosas o angulares ricas en reservas (Kreplak et al., 2021).



Figura 2. Morfología general de la planta de chícharo (*Pisum sativum*) y detalle de la flor. Nota. Adaptado de *Morphology of pea plant with fruits, flowers, green leaves and root system* [Ilustración], por Luayana, s.f., Dreamstime.

3.10.2 Valor Nutricional

El chícharo se destaca en la dieta humana por su excepcional densidad de nutrientes, siendo una de las principales fuentes de proteínas vegetales de alta calidad, esenciales para la reparación tisular y el mantenimiento metabólico (Ge et al., 2023). Su composición incluye un elevado contenido de fibra dietética, la cual, en combinación con su estructura de carbohidratos complejos, le otorga un bajo índice glucémico; esta característica es fundamental para la regulación de la glucosa en sangre y la prevención de enfermedades metabólicas (Akin et al., 2025). Asimismo, esta leguminosa es rica en micronutrientes críticos, aportando cantidades significativas de vitaminas A y C, que actúan como antioxidantes, además de minerales esenciales como hierro, potasio y magnesio, que contribuyen al equilibrio electrolítico y la salud ósea (Hacisalihoglu et al., 2021).

3.11. Harina de Chícharo

La transformación del chícharo en harina representa una solución tecnológica avanzada para la industria alimentaria, permitiendo la creación de ingredientes funcionales con propiedades tecno-funcionales superiores, como una alta capacidad de retención de agua y emulsificación (Peña-Peña et al., 2022). Esta materia prima se ha consolidado como una alternativa técnica para la sustitución parcial de harinas de cereales en productos de panificación y pastas, mejorando no solo el perfil proteico, sino también la respuesta glucémica del producto final (Bustamante et al., 2021). Además, mediante procesos de extrusión y fraccionamiento en seco, la harina de chícharo permite el desarrollo de análogos cárnicos y sistemas coloidales estables, respondiendo a la demanda tecnológica de alimentos "clean label" y libres de gluten que mantienen atributos sensoriales aceptables para el consumidor (Sandberg et al., 2019).

3.11.1 Proceso de secado y molienda del chícharo

El proceso de transformación del chícharo en un insumo industrial comienza con un secado controlado, donde la humedad de la semilla se reduce del 20-25 % a niveles inferiores al 14 % para garantizar la estabilidad microbiológica y prevenir la degradación enzimática (Ge et al., 2020). Este secado puede realizarse mediante aire caliente o liofilización, siendo este último el método que mejor preserva las propiedades termolábiles de las proteínas y vitaminas. El grano seco se somete a una molienda mecánica, que puede ser de tipo impacto o de rodillos, con el fin de fragmentar la matriz celular y liberar los gránulos de almidón y cuerpos proteicos (Pulivarthi et al., 2021). Esta etapa es crucial, ya que el tamaño de partícula resultante determina directamente las propiedades de solubilidad, viscosidad y capacidad de absorción de agua en aplicaciones alimentarias finales (Meenakshi Sundaram et al., 2024).

4.JUSTIFICACIÓN

A nivel nacional, el pan no es solo un pilar de la canasta básica; es un eje central de la identidad cultural y uno de los motores más dinámicos de la industria alimentaria, con una presencia casi universal en los hogares (CANAINPA, 2020). Sin embargo, esta hegemonía del trigo se traduce en una barrera de exclusión crítica para la población con enfermedad celíaca. Este trastorno sistémico autoinmune, cuya prevalencia ha escalado drásticamente en las últimas décadas, convierte un alimento cotidiano en un riesgo latente para la salud (King et al., 2020).

La crisis se agrava ante un mercado actual de productos *gluten-free* profundamente deficiente: la oferta actual no solo es inaccesible, sino que vulnera la seguridad alimentaria al depender de almidones refinados que carecen de valor real. Estos productos no nutren; perpetúan deficiencias crónicas en el paciente celíaco (Estévez et al., 2024)

Para romper este paradigma, este proyecto propone una innovación formulativa mediante la incorporación de harina de chícharo (*Pisum sativum*). A diferencia de los sustitutos convencionales, que actúan como simples ingredientes de relleno o de mera sustitución estructural, el chícharo se erige como un ingrediente bioactivo y funcional de élite. Su capacidad para transformar el pan sin gluten en una fuente densa de proteínas de alta calidad y fibra dietética asegura que el producto no solo nutra, sino que repare y proteja el organismo. Esta propuesta no solo busca igualar al pan tradicional, sino superarlo, optimizando la salud intestinal y la respuesta glucémica de quienes más lo necesitan (Guardiola-Márquez et al., 2020; Nyhan et al., 2021).

Desde la perspectiva agroindustrial, esta investigación representa un ejercicio de alto valor agregado sobre un cultivo de importancia agrícola. Al integrar procesos de transformación tecnológica para superar las limitaciones reológicas de las harinas sin gluten, el proyecto fortalece la cadena agroalimentaria y diversifica el aprovechamiento de leguminosas. Así, la ingeniería agroindustrial se posiciona como el puente necesario para convertir una materia prima primaria en una solución funcional estandarizada, garantizando la inocuidad y la eficiencia en el procesamiento de alimentos especializados.

5.HIPÓTESIS

Es posible desarrollar una dona libre de gluten a base de harina de chícharo, combinada con almidones (harina arroz y harina de maíz), que asemeje las características organolépticas de una dona de trigo convencional.

6. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar y evaluar una dona formulada con harina de chícharo reducida en azúcares, como alternativa orientada a satisfacer las necesidades nutricionales y sensoriales de consumidores intolerantes al gluten.

6.1. Objetivos específicos

- Diseñar una formulación para donas horneadas sustituyendo harina de trigo por harina de chícharo, con el fin de aumentar el contenido proteico respecto a una dona comercial estándar.
- Cuantificar la composición proximal (humedad, cenizas, proteína, grasa y fibra) de la dona a base de harina de chícharo para determinar su aporte nutricional.
- Evaluar la aceptabilidad sensorial de donas elaboradas con diferentes niveles de sustitución de harina de chícharo mediante pruebas con consumidores, para determinar la formulación con mayor potencial de éxito en el desarrollo de productos de panificación.
- Determinar las propiedades colorimétricas de las donas horneadas mediante el espacio de color CIELAB (parámetros L^* , a^* y b^*), para evaluar el impacto de la sustitución de harina de trigo por harina de chícharo en la apariencia visual del producto final.

7. MATERIALES Y METÓDO

7.1 Materiales

Para el desarrollo de las formulaciones de panificación funcional, se emplearon materias primas de grado alimenticio, las cuales se clasificaron de acuerdo con su función tecnológica dentro de la matriz de la masa.

7.1.1 Agentes Estructurales y Harinas Base

Como fuentes de almidón y proteína estructural, se utilizaron los siguientes polvos finos:

1. Harina de chícharo (*Pisum sativum*): Obtenido a través del proveedor Harinas Viesca, este actuará como el ingrediente principal, objeto de estudio, seleccionado por su elevado contenido proteico y propiedades tecnológicas.
2. Harina de maíz nixtamalizado: (Maseca®, Grupo Maseca, México), empleada como coadyuvante en la estructura gluten-free.
3. Harina de arroz: (Tres Estrellas®, La Moderna, México), utilizada para aportar suavidad y ligereza a la miga.
4. Harina de trigo: (Tres Estrellas®, La Moderna, México), empleada exclusivamente en la formulación control (testigo) para la comparación de parámetros reológicos y sensoriales.

7.1.2 Ingredientes Líquidos y Emulsificantes

La fase líquida y lipídica se constituyó por insumos estandarizados para asegurar la homogeneidad de las muestras:

- Leche entera pasteurizada: (Santa Clara®, México), utilizada como medio de hidratación y aporte de sólidos lácteos.
- Huevo de gallina: Empleado como agente aglutinante y emulsificante natural.
- Aceite vegetal: Utilizado como fase lipídica para mejorar la palatabilidad y textura.
- Agua purificada: Empleada para ajustar la consistencia y niveles de hidratación requeridos por la harina de leguminosa.

7.1.3 Agentes Leudantes y Aditivos Saborizantes

- Polvo para hornear: (Rexal®, B&G Foods, México), compuesto por bicarbonato de sodio y agentes acidulantes para la expansión volumétrica por liberación de CO₂.
- Miel de abeja: Utilizada como agente edulcorante natural y humectante (higroscópico).
- Extracto de vainilla: (Molina®, México), empleado como agente saporífero para la estandarización del perfil aromático de las muestras.

7.2 Método de elaboración

El proceso de elaboración se llevó a cabo bajo condiciones controladas, siguiendo un protocolo de mezcla y cocción estandarizado para garantizar la reproducibilidad de las muestras.

7.2.1 Preparación de la mezcla y homogeneización

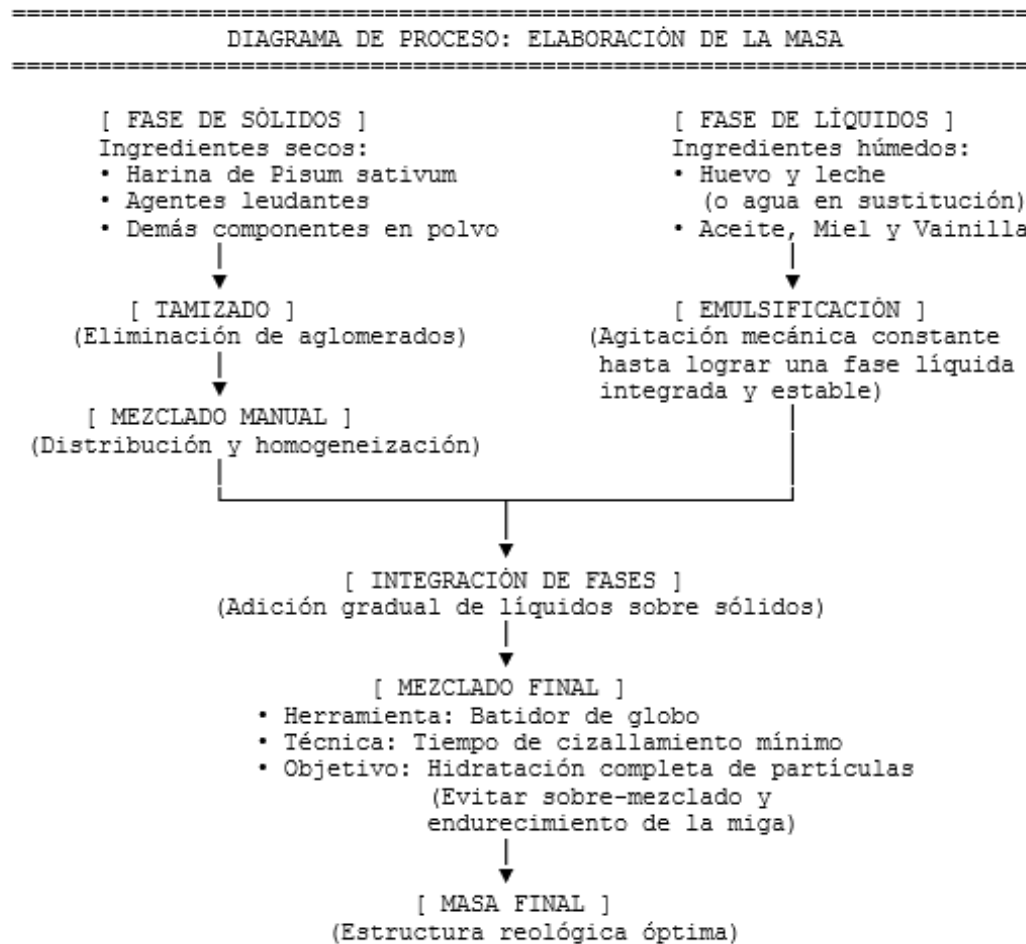


Figura 3. Diagrama de proceso para la preparación y homogeneización de la masa a base de harina de *Pisum sativum*. Nota. Elaboración propia. Diagrama de flujo de la fase de mezclado de los ingredientes sólidos y líquidos. En la fase de líquidos se contempla la sustitución de huevo y leche por agua, correspondiente a las formulaciones de los tratamientos modificados.

7.2.2 Proceso de Cocción y Control Térmico

Para la formación y cocción de las piezas, se utilizó un equipo de horneado por contacto (máquina de mini donas) previamente estabilizado térmicamente.

1. Dosificación: La masa fue transferida a una manga de polietileno para permitir una dosificación más precisa. Cada cavidad del equipo se llenó al 75% de su capacidad total (3/4 partes), permitiendo el espacio necesario para la expansión volumétrica durante la acción de los agentes leudantes.
2. Tratamiento Térmico: El proceso de horneado se realizó de forma ininterrumpida durante un intervalo de 120 a 240 segundos, dependiendo de la transferencia de calor del equipo, hasta alcanzar las propiedades organolépticas deseadas (pardeamiento no enzimático o reacción de Maillard).

A continuación, se muestran las formulaciones para las donas con sustitución de harina de chícharo en respectivos porcentajes y la formulación para la muestra de control.

Tabla 1

Composición de las formulaciones del diseño experimental y tratamiento testigo

Ingredientes	Cantidad (g)	Tratamiento
Harina de chícharo	30	Formulación 1 (80%)
Harina de maíz	5	
Harina de arroz	5	
Polvo para hornear	5	
Miel de abeja	10	
Agua purificada	30	
Harina de chícharo	26	Formulación 2 (65%)
Harina de maíz	7	
Harina de arroz	7	
Polvo para hornear	5	
Miel de abeja	10	
Agua purificada	47	
Harina de chícharo	10	Formulación 3 (25%)
Harina de maíz	15	
Harina de arroz	15	
Polvo para hornear	5	
Miel de abeja	10	
Agua purificada	54	
Harina de trigo	40	Testigo
Huevo	27.08	
Leche	15.45	
Vainilla	0.02	
Miel de abeja	10	
Aceite	2.2	
Polvo para hornear	5	

Nota. Elaboración propia. Las cantidades de los ingredientes están expresadas en gramos (g). Los porcentajes indicados en las formulaciones 1, 2 y 3 (80 %, 65 % y 25 %) corresponden a la proporción de harina de *Pisum sativum* utilizada. En estas formulaciones experimentales se aplicó la sustitución de huevo y leche por agua purificada, en contraste con los ingredientes de origen animal utilizados en el tratamiento testigo.

7.2.3 Estabilización Post-Cocción

Una vez finalizado el tratamiento térmico, las muestras fueron extraídas mediante utensilios poliméricos inertes para evitar daños estructurales. Finalmente, se dispusieron en rejillas de acero inoxidable para su enfriamiento a temperatura ambiente, facilitando la estabilización de la estructura interna y la evacuación de vapor de agua remanente antes de su posterior análisis y/o decoración.

7.3. Análisis químico proximal

7.3.1. Determinación de humedad

Para determinar la variable humedad en las donas (diseño experimental y testigo), se siguió la metodología propuesta por la A.O.A.C. 44 – 16 (2003). Se colocó la cápsula de aluminio en la estufa de secado (Craft) a peso constante, posteriormente en un desecador la cápsula se enfrió y con ayuda de una balanza analítica (Biomedica, BA2204C) se registró su peso. Posteriormente, a la cápsula se agregó 5 g de la dona homogeneizada (diseño experimental y testigo) y se colocó en la estufa a 105° C por 6 h. Después se almacenó en un desecador para enfriar y se registró el peso de la cápsula con la muestra seca. La medición de cada una de las donas se realizó por triplicado. Para el cálculo del porcentaje de humedad se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%Humedad = \frac{W1 - W2}{W} \times 100$$

Donde:

W1 es el peso de la cápsula más la muestra húmeda.

W2 es el peso de la cápsula más la muestra seca.

W es el peso de la muestra.

7.3.2. Contenido de ceniza

Para determinar la variable ceniza en las donas (diseño experimental y testigo) se siguió la metodología propuesta por la A.O.A.C 923.03 (2003). Se colocó el crisol en la estufa de secado (Craft) a peso constante, posteriormente en un desecador se enfrió a temperatura ambiente, y con ayuda de una balanza analítica (Biomedica BA2204C) se registró su peso. Después se agregó 3 g de la dona (diseño experimental y testigo) en el crisol, se calcinó con un mechero y se llevó a la mufla (Felisa, FE-361) a 550 °C por 6 horas. Después de seis horas se colocó el crisol con

las cenizas en un desecador hasta enfriar, enseguida se pesó en la balanza analítica. La medición de cada una de las muestras se realizó por triplicado. Para el cálculo del porcentaje de ceniza se utilizó siguiente fórmula:

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{p1 - p2}{p} \times 100$$

Donde:

p1 es el peso del crisol con cenizas

p2 es el peso del crisol vacío

p es el peso de la muestra

7.3.3. Cuantificación de proteína

Para determinar la variable proteína en la dona (diseño experimental y testigo) se siguió la metodología Kjeldahl propuesta por la A.O.A.C. 955.04 (2003), la cual se divide en tres fases (digestión, destilación y titulación). Para la digestión, en un tubo Kjeldahl se colocó 5 g de mezcla digestora sulfato de potasio anhidro (K_2SO_4) y sulfato cúprico pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) envuelto en papel libre de nitrógeno, después se pesó 0.5 g de la dona (diseño experimental y testigo) y se vertió en el tubo, posteriormente, se agregó 15 ml de H_2SO_4 (ácido sulfúrico concentrado). Esto se llevó al digestor (Büchi, K-425/K/436) por 3 horas, al finalizar la digestión se agregaron 20 ml de agua destilada.

Para la destilación, en un matraz Erlenmeyer se agregaron 50 ml de ácido bórico al 2% y tres gotas de rojo de metilo, los cuales se colocaron en la boquilla de salida del destilador (Büchi modelo K-350) por un intervalo de cinco minutos. En la titulación se utilizó H_2SO_4 al 0.1 N. La medición de cada una de las muestras se realizó por triplicado. Para el cálculo de la concentración de nitrógeno se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%N = \frac{(Vm - Vb) \times 0.014 \times NH_2SO_4}{M} \times 100$$

Donde:

Vm es el volumen de H_2SO_4 del gasto en la muestra

Vb es el volumen de H_2SO_4 del gasto en blanco

N es la normalidad de H_2SO_4

M es el peso de la muestra

Para la determinación de Proteína se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%P = \%N \times 6.25$$

7.3.4. Determinación de extracto etéreo

Para determinar la variable extracto etéreo se siguió la metodología Goldfish propuesta por la A.O.A.C. 920.309 (2003). En la estufa de secado (Craft) se colocó el vaso Büchi a 105 °C hasta el peso constante, posteriormente en un desecador el vaso se enfrió, y con ayuda de una balanza analítica (Biomedica, BA2204C) se registró su peso. En un cartucho de celulosa se colocó la muestra de dona seca (diseño experimental y testigo) proveniente de la determinación de humedad, después se llevó al extractor Büchi (E816-HE), el equipo se programó con éter de petróleo como solvente y se programó a 3 h de extracción, 30 minutos de lavado y 30 minutos de secado. El vaso se retiró y se pesó. La medición de cada una de las muestras se realizó por triplicado. Para el cálculo del porcentaje de extracto etéreo se hizo por diferencia de peso y se utilizó siguiente fórmula:

$$\% \text{ Extracto etéreo} = \frac{M2 - M1}{M} \times 100$$

Donde:

M1 es el peso del vaso solo

M2 es el peso del vaso con grasa

M es el peso de la muestra

7.3.5. Determinación de fibra

Para determinar la variable fibra se siguió la metodología propuesta por la A.O.A.C. 962.09 (2003). La muestra de dona (diseño experimental y testigo) seca y sin grasa se vertió en un vaso Berzelius al cual se le agregó 200 ml de H₂SO₄ al 0.255 N, el vaso con la solución se colocó en el determinador de fibra (Labconco, LAC300001-00) por 30 minutos a ebullición. Posteriormente, se filtró y lavó con agua destilada hasta obtener un pH neutro. Después agregó nuevamente la muestra al vaso Berzelius con 200 ml de NaOH (hidróxido de sodio) al 0.313 N, se colocó en el determinador de fibra por 30 minutos a ebullición, se filtró y lavó con agua destilada hasta obtener un pH neutro, por último se le agregó 25 ml de C₂H₆O (alcohol etílico) y se colocó en un crisol, después se llevó a la estufa (Craft) a 105 °C por 4 h y se registró su peso con ayuda de la balanza analítica (Biomedica modelo BA2204C). Después el crisol se colocó en una mufla (Felisa modelo FE-361) a 550 °C por 6 h. Al finalizar, se realizó el pesaje final de la muestra. Cada análisis de la dona (diseño experimental y testigo) se realizó por triplicado. Para el cálculo del contenido de fibra se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Fibra} = \frac{\text{Peso del crisol con muestra seca} - \text{Peso del crisol con muestra calcinada}}{\text{Peso real de la muestra}} \times 100$$

7.4. Determinación de parámetros

7.4.1. Color

Para el análisis integral del color en donas y productos de panificación, el sistema CIE $L^*a^*b^*$ se establece como el estándar, debido a su capacidad para cuantificar cambios cromáticos imperceptibles al ojo humano durante el procesamiento térmico (Ostojić et al., 2022). En este modelo, mientras que la coordenada L^* mide la luminosidad (oscilando entre la claridad y el pardeamiento excesivo) y a^* la transición entre tonos verdes y rojos, la coordenada b^* adquiere una relevancia crítica en la evaluación de donas. Esta última cuantifica los tonos amarillos (valores positivos), los cuales están intrínsecamente asociados con el color dorado deseable, resultado de la reacción de Maillard y la caramelización de azúcares superficiales (Zhang et al., 2023). Asimismo, la estabilidad de b^* se ve influenciada por la presencia de pigmentos naturales, como los carotenoides presentes en harinas no convencionales o leguminosas, y por el perfil oxidativo del aceite utilizado en la fritura, el cual puede alterar la saturación cromática final del producto (Ramos-Díaz et al., 2021). Por tanto, el seguimiento de estas tres coordenadas permite no solo estandarizar la apariencia visual, sino también monitorear de forma indirecta la formación de compuestos de sabor y aroma vinculados al pardeamiento no enzimático.

7.4.2. Evaluación sensorial

El análisis sensorial se llevó a cabo en el Instituto de Ciencias Agropecuarias mediante una prueba afectiva de preferencia por ordenamiento, siguiendo la metodología descrita por Civille et al. (2024). El diseño experimental contempló la participación de un panel de 50 jueces consumidores no entrenados ($n=50$), a quienes se les entregó un formato de evaluación y se les presentaron tres muestras de donas ($k=3$) servidas en platos individuales y codificadas de forma aleatoria: 257 (formulación con 25% de harina de chícharo), 723 (formulación al 65%) y 849 (formulación al 80%), las cuales fueron evaluadas tomando como referencia una dona testigo convencional. Durante la prueba, se utilizó agua como agente neutralizante entre cada estímulo para una correcta valoración.

Para el análisis de resultados de la prueba sensorial se realizó un cuadro de concentración de datos donde se anotaron: número de juez, nombre, edad, así como los códigos de las muestras y el valor dado por cada juez. El análisis estadístico se llevó a cabo la prueba de Kramer para determinar si existe un producto preferido frente a otros, así como un análisis de varianza por rangos prueba de Friedman con un nivel de significancia del 5 %, para esto se utilizó la siguiente fórmula:

$$\chi^2 = \left[\frac{12}{(k)(J)(J+1)} \times \sum T_j^2 \right] - 3k(J+1)$$

Donde:

T es el número total de cada columna

J es el número de productos o columnas

k es el número de jueces o filas

7.5. Diseño experimental

El análisis de resultados se realizó con el programa Statgraphics Centurion XVI.I, los datos de fueron analizados por análisis de varianza y cuando existieron diferencias significativas ($p < 0.05$) se utilizó una comparación de medias de *Tukey*.

8.RESULTADOS

8.1. Elaboración de las donas según su formulación.

La figura 4 detalla el aspecto visual de las formulaciones desarrolladas a través de sus respectivos paneles (A, B y C). A simple vista, el producto final exhibe una notable uniformidad, sin que las variaciones entre las diferentes formulaciones generen una diferencia morfológica o de coloración perceptible. La corteza presenta el característico color dorado a café claro de un producto de panificación horneado, diferenciándose claramente de la textura superficial que dejaría un proceso de fritura profunda. Este acabado homogéneo es resultado del uso de una máquina para mini donas, cuyas placas de cocción estandarizan la exposición térmica en la superficie exterior de las muestras. Al evaluar la sección transversal, se observa que la matriz interna de la masa desarrolló una miga con características de alveolado y retención de humedad muy similares en todos los tratamientos, lo que indica que las sustituciones realizadas en las formulaciones no afectaron negativamente la estructura física del pan dulce.

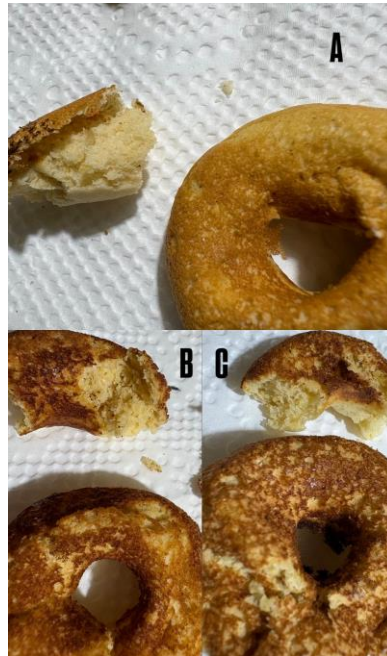


Figura 4. Aspecto visual de las diferentes formulaciones de mini donas horneadas: (A) Formulación 65%, (B) Formulación 80% y (C) Formulación 25%. Nota. Los paneles (A), (B) y (C) representan los diferentes tratamientos evaluados en el estudio. Las imágenes se presentan de manera ilustrativa y no están a escala real. Fotografía propia (2026).

8.2 Formulación de las donas según su porcentaje de harina.

Se evaluó el efecto de tres formulaciones experimentales basadas en diferentes porcentajes de concentración de harina (25%, 65% y 80%) sobre las características físicas del producto final. Como se ilustra en las figuras correspondientes (Figuras 5), la variación en la concentración de harina no produce alteraciones visuales significativas en la morfología o apariencia de la corteza. No obstante, se observó una modificación estructural evidente en la miga de las donas; esta variación interna resulta ventajosa, ya que actúa como un indicador macroscópico que permite distinguir claramente el impacto del porcentaje de harina utilizado en cada uno de los tratamientos.

Los resultados obtenidos evidencian que el comportamiento termodinámico en la superficie del producto es independiente de los cambios reológicos internos generados por la adición de harina de chícharo (*Pisum sativum*). La ausencia de alteraciones visuales significativas en la corteza entre las formulaciones del 25%, 65% y 80% puede atribuirse a la saturación de las reacciones de pardeamiento no enzimático. La harina de chícharo posee un alto contenido de proteínas ricas en aminoácidos esenciales, como la lisina, los cuales son altamente reactivos en la reacción de Maillard cuando se exponen a las elevadas temperaturas del proceso de cocción. Esta alta reactividad térmica en la superficie provoca un desarrollo de color

rápido y uniforme que enmascara las diferencias en la concentración de la harina (Purlis, 2010; Millar et al., 2019).

Por el contrario, la modificación estructural evidente en la miga refleja la disrupción de la matriz viscoelástica a medida que aumenta la concentración de harina de chícharo. A diferencia de la harina de trigo, la harina de chícharo carece de proteínas formadoras de gluten, lo que altera significativamente la capacidad de la masa para retener gases durante la expansión térmica (Millar et al., 2019). Además, el almidón y la fibra dietética presentes en el chícharo poseen una capacidad de absorción de agua y temperaturas de gelatinización diferentes.

Según Bojňanská et al. (2021), el incremento en la proporción de harinas de leguminosas en matrices de panificación interfiere directamente con la formación de la red continua de la miga, resultando en variaciones macroscópicas observables en la porosidad, el tamaño de los alvéolos y la densidad del producto. Por lo tanto, el hecho de que la miga actúe como un indicador macroscópico es coherente con la transición de una matriz estructural cohesiva (a menores concentraciones) a una matriz más densa o fragmentada conforme el porcentaje de harina de chícharo se incrementa hasta el 80%, un efecto de fragmentación que se acentúa de forma natural al utilizar agua como medio líquido en lugar de ingredientes con propiedades aglutinantes y emulsificantes, como el huevo y la leche, en los tratamientos de alta sustitución.

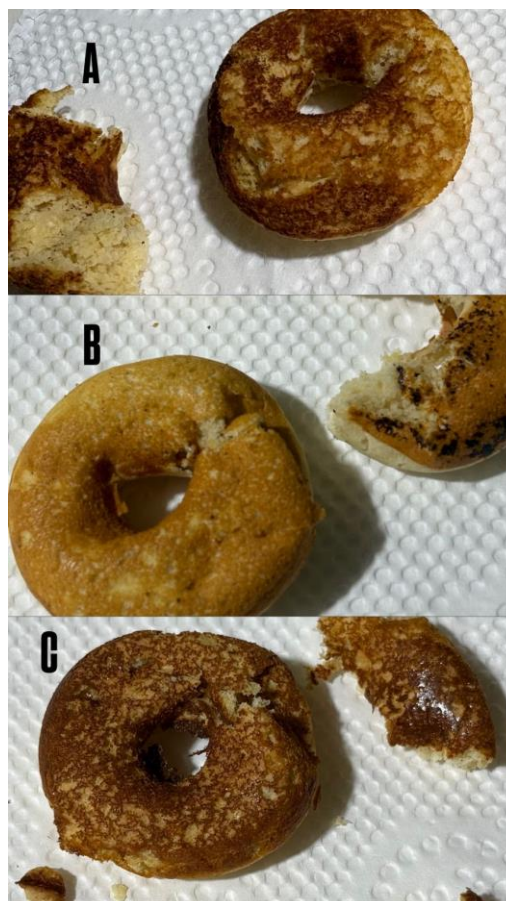


Figura 5. *Análisis visual de la corteza y la miga en donas experimentales con diferentes concentraciones de harina de chícharo (Pisum sativum)* Nota. Las muestras correspondientes a cada tratamiento se identifican como: (A) formulación al 80%, (B) formulación al 65% y (C) formulación al 25%. Las imágenes se presentan de manera ilustrativa y no están a escala real. Fotografía propia (2026).

8.3. Análisis químico proximal

8.3.1. Humedad

Al analizar el contenido de humedad de las distintas formulaciones (Figura 6), se observa una tendencia a la disminución del porcentaje de agua conforme aumenta la sustitución de harina de trigo por harina de chícharo. El tratamiento con mayor concentración de leguminosa (80%) presentó el nivel más bajo de humedad (36.00%), mostrando diferencias significativas respecto al resto de las muestras. Por su parte, la formulación al 65% ocupó un lugar intermedio (39.21%), logrando diferenciarse estadísticamente tanto del nivel más bajo como del grupo superior.

Finalmente, se determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre la muestra con un 25% de inclusión (45.68%) y el testigo (45.35%). Este comportamiento indica que, hasta una sustitución del 25%, la capacidad de retención de humedad de la masa es equivalente a la de una formulación convencional, no obstante, a partir de una concentración del 65% en adelante, la incorporación de harina de chícharo ejerce un efecto inhibitorio en la retención de agua, probablemente debido a las diferencias en la composición proteica y la capacidad de hidratación de los componentes estructurales de la leguminosa frente al gluten del trigo (García et al., 2024).

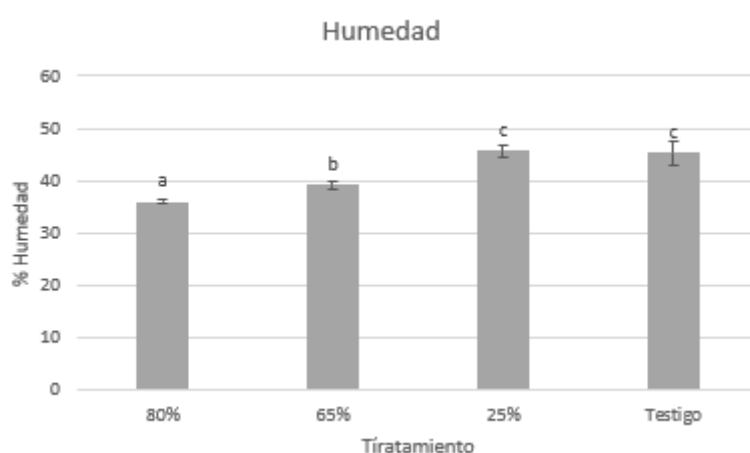


Figura 6. *Comparación del porcentaje de humedad en diferentes formulaciones de harina de chícharo frente al testigo.* Nota. Los datos se expresan como la media de tres réplicas \pm la desviación estándar (barras de error). Letras diferentes sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, determinadas mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) seguido de una prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

Se observó una tendencia inversamente proporcional entre el porcentaje de sustitución por harina de chícharo y la retención de agua en el producto final horneado. Mientras que la muestra testigo (45.35%) y la formulación con 25% de inclusión (45.68%) no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$) los tratamientos con 65% y 80% de sustitución mostraron reducciones drásticas en la humedad (39.21%, letra b; y 36.00%, letra a, respectivamente).

Este comportamiento sugiere la existencia de un umbral de tolerancia estructural en la matriz de la masa. En niveles de sustitución bajos (hasta 25%), la proporción remanente de harina de trigo es suficiente para desarrollar una red de gluten continua y viscoelástica. Durante la cocción, esta red actúa como una barrera física termoestable que atrapa eficientemente el vapor de agua, limitando su migración hacia la corteza y su posterior evaporación en el ambiente del horno (Klompfas et al., 2023)

No obstante, a partir del 65% de sustitución, la drástica dilución de las proteínas formadoras de gluten genera una disrupción en la arquitectura de la miga. Si bien las proteínas globulares y las fibras características de la harina de chícharo poseen una alta afinidad por el agua durante la etapa de mezclado, estas carecen de la extensibilidad y capacidad de retención termoplástica propias del gluten al someterse a altas temperaturas (Millar et al., 2019). En consecuencia, la matriz estructural de las donas con alta concentración de leguminosa se vuelve más porosa y menos cohesiva, ofreciendo una menor resistencia a la presión de vapor generada internamente durante la cocción. Este efecto inhibitorio en la retención de agua, que facilita una mayor tasa de deshidratación térmica, concuerda con lo reportado por García et al. (2024), quienes señalan que la divergencia en el perfil proteico y la capacidad de hidratación de los componentes estructurales de la leguminosa frente al gluten del trigo comprometen severamente la capacidad de encapsulación de humedad en matrices horneadas.

8.3.2. Cenizas

Los resultados obtenidos de cenizas se muestran en la Figura 7. Se aprecia una variabilidad significativa entre las formulaciones: el contenido de cenizas es de 2.96% para la formulación al 80%, 6.05% para la de 65%, 6.75% para la de 25%, mientras que la dona convencional (testigo) cuenta con 3.47%. Al analizar estos datos estadísticamente, se observa que las formulaciones al 65% y 25% comparten el superíndice 'a', lo que indica que, a pesar de la diferencia en sus medias, no existe una diferencia significativa ($p>0.05$) entre ellas. Por el contrario, la formulación al 80% y el testigo comparten el superíndice 'b', situándose en un rango estadístico inferior.

Esto demuestra que, salvo en la formulación al 80%, la incorporación de harina de chícharo (*Pisum sativum*) incrementa notablemente el contenido de minerales en comparación con el testigo, alcanzando un valor máximo en la muestra al 25% (6.75%). Este fenómeno se explica al considerar que las cenizas representan el contenido total de minerales; mientras que, según Jiang et al. (2023), la harina de trigo suele presentar un bajo contenido mineral debido al proceso de molienda que elimina el salvado, las leguminosas son naturalmente ricas en potasio, magnesio,

fósforo y hierro (Maphosa y Jideani, 2020). En consecuencia, la formulación al 25% prácticamente duplica el aporte mineral de la dona convencional, otorgándole una mayor densidad nutricional y sugiriendo que los minerales de la leguminosa permanecen estables durante el proceso de cocción.

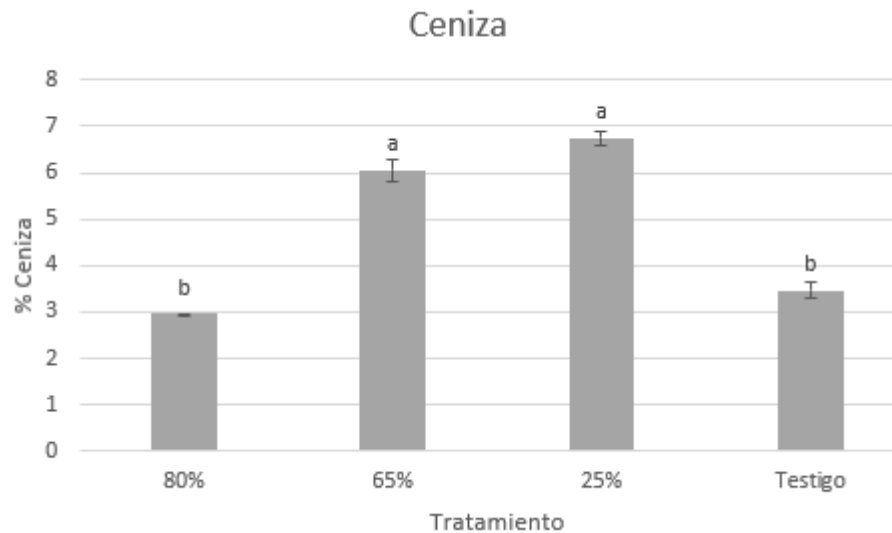


Figura 7. Efecto de la sustitución de harina de trigo por harina de chícharo en el contenido de cenizas de donas. Nota. Los datos representan el promedio de dos réplicas independientes \pm la desviación estándar (indicada por las barras de error). Las letras distintas (a, b) sobre las barras señalan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, determinadas mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor seguido de una prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

Los resultados de la determinación de cenizas (Figura 7) evidencian que la sustitución parcial de harina de trigo por harina de chícharo (*Pisum sativum*) modifica significativamente el perfil mineral de las donas horneadas, aunque de manera no lineal. Las formulaciones con 25% y 65% de inclusión presentaron los valores más altos (6.75% y 6.05%, respectivamente), compartiendo el superíndice 'a', lo que indica que estadísticamente pertenecen al mismo grupo de máxima concentración mineral.

Este incremento notable frente a la dona convencional o testigo (3.47%) concuerda con la literatura. No obstante, se observó un descenso atípico en el contenido de cenizas para la formulación con 80% de sustitución (2.96%), situándose estadísticamente en el mismo nivel que el testigo; si bien teóricamente la muestra con mayor cantidad de leguminosa debería presentar el mayor índice de cenizas, esta fluctuación sugiere que el contenido mineral final no depende exclusivamente de la proporción de las harinas base. En matrices horneadas complejas, la concentración de cenizas también está fuertemente influenciada por otros ingredientes menores

ricos en compuestos inorgánicos (como cloruro de sodio o agentes leudantes químicos). Alteraciones reológicas en masas con muy alta concentración de chícharo podrían haber requerido ajustes en estos componentes menores, o bien, variaciones en la homogeneización de la masa y el cálculo de la base seca de la muestra podrían explicar esta desviación de la tendencia lineal esperada (Ismail y Nielsen, 2024).

8.3.3. Extracto etéreo

En la figura 8 se observa que las formulaciones de dona a base de chícharo presentan un contenido graso estadísticamente superior al del testigo. Las muestras del 80%, 65% y 25% obtuvieron promedios de 9.83%, 10.29% y 10.07%, respectivamente, agrupándolos en una misma categoría estadística (a). Por el contrario, la dona tradicional (testigo) mostró un contenido graso significativamente menor, de 1.76%.

La diferencia de aproximadamente 8 puntos porcentuales observada entre las formulaciones con harina de chícharo y el tratamiento testigo sugiere que la incorporación de leguminosas altera significativamente las propiedades fisicoquímicas de la masa. De acuerdo con Badui Dergal (2019), la sustitución de harina de trigo por harinas de leguminosas en productos de panificación modifica la porosidad de la estructura. Mientras que el gluten del trigo forma una red que mantiene poros pequeños y aislados actuando como una barrera, la ausencia de éste en las leguminosas genera una matriz estructural similar a una esponja, con canales grandes y abiertos. En consecuencia, durante la fase de enfriamiento posterior a la cocción, esta red interconectada facilita una mayor absorción del aceite superficial hacia el interior del producto por efectos de succión y capilaridad, justificando así el incremento en la absorción frente a la formulación tradicional.

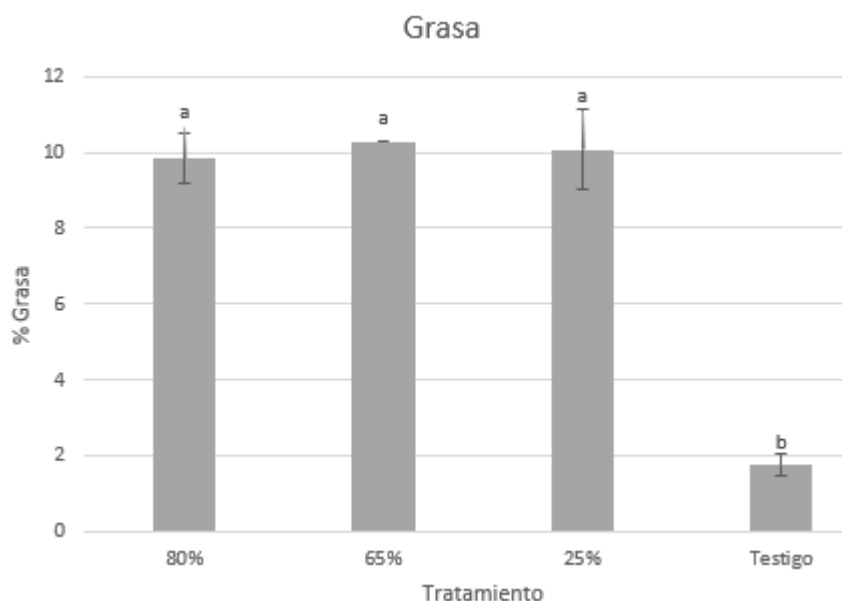


Figura 8. Comparativa del contenido graso en formulaciones de donas con harina de chícharo y muestra testigo. Nota. Los datos representan el promedio de dos

réplicas independientes \pm la desviación estándar (indicada por las barras de error). Las letras distintas (a, b) sobre las barras señalan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, determinadas mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor seguido de una prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

Los resultados del análisis de extracto etéreo (Figura 8) evidencian que las formulaciones con harina de chícharo presentan un contenido lipídico estadísticamente superior al del testigo. Las muestras con 80%, 65% y 25% de sustitución registraron valores promedio de 9.83%, 10.29% y 10.07%, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellas (grupo a). En contraste, la dona convencional (testigo) mostró un contenido graso considerablemente menor, equivalente al 1.76% (grupo b).

Dado que el producto fue sometido a un proceso de horneado, esta diferencia aproximada de 8 puntos porcentuales no se deriva de la absorción de aceite del medio de cocción fenómeno característico de la fritura, sino de la composición intrínseca de la matriz de la masa y sus interacciones fisicoquímicas. En la panificación convencional, el gluten forma una red continua que domina la estructura del producto; sin embargo, al sustituir parcial o totalmente el trigo por harinas de leguminosas, se interrumpe esta red viscoelástica. Para contrarrestar el impacto negativo en la textura y la suavidad de la miga, las formulaciones con harinas no convencionales a menudo incorporan o retienen de manera más eficiente los lípidos añadidos en la receta, los cuales actúan como plastificantes y lubricantes de la matriz almidón-proteína (Cauvain, 2020).

Además, en sistemas de panificación basados en agua, donde se prescinde de ingredientes que fungen como emulsificantes tradicionales (como el huevo o la leche láctea), la estabilización térmica recae directamente en las propiedades tecnológicas de las harinas base. En este sentido, Cui et al. (2020) destacan que las proteínas globulares presentes en las leguminosas poseen una alta capacidad emulsificante, lo que permite una mayor retención e integración de la fase lipídica dentro de la estructura alveolar de la masa durante el tratamiento térmico. Esto explicaría por qué, independientemente de la concentración de chícharo (25%, 65% u 80%), la matriz estabiliza y retiene un porcentaje de grasa uniformemente superior (alrededor del 10%) en comparación con la formulación testigo.

8.3.4. Proteína

En la figura 9 se observa el contenido de proteína en las diferentes formulaciones. Los datos muestran que la muestra al 25% (6.00%) presenta un contenido proteico inferior al del testigo (7.33%); no obstante, estadísticamente no se observa una diferencia significativa ($p > 0.05$) entre estas dos formulaciones. A partir de la sustitución del 65% (9.48%) y el 80% (11.01%), el aporte proteico supera

significativamente al estándar testigo experimental. Si bien la dona convencional basa su perfil proteico principalmente en el gluten del trigo, el chícharo al ser una leguminosa aporta una densidad proteica naturalmente superior. Es notable que la formulación al 80% ofrece un incremento del 50.2% en el contenido de proteínas respecto a la dona tradicional. Considerando que esta matriz horneada prescinde de ingredientes de origen animal que tradicionalmente aportan nitrógeno (como el huevo y la leche), este salto cuantitativo subraya el potencial funcional exclusivo de la leguminosa, posicionando al producto no solo como un antojo, sino como una alternativa con mayor valor nutricional y una excelente fuente complementaria de proteína vegetal (Lu et al., 2020).

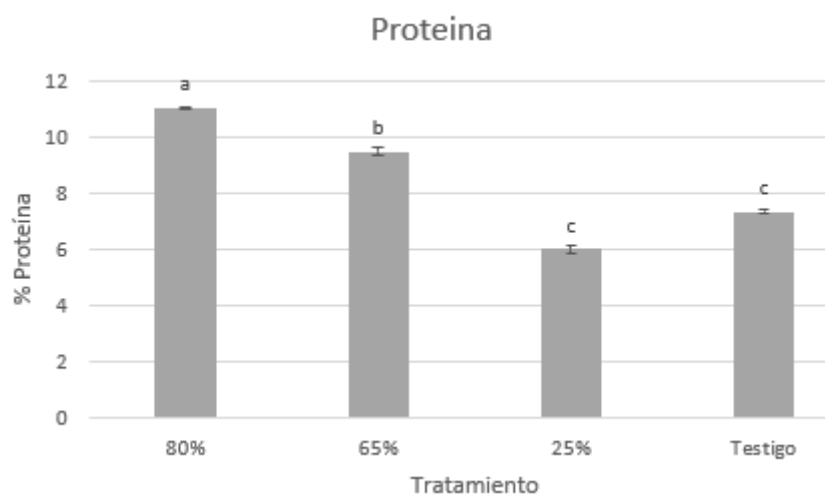


Figura 9. Contenido de proteína en formulaciones de donas con diferentes porcentajes de harina de chícharo. Nota. Los datos representan el promedio de dos réplicas independientes \pm la desviación estándar (indicada por las barras de error). Las letras distintas (a, b, c) sobre las barras señalan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, determinadas mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor seguido de una prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

En la Figura 9 se expone el análisis cuantitativo del contenido de proteína presente en las distintas formulaciones evaluadas. El comportamiento de los datos revela una dinámica directamente proporcional al nivel de sustitución, con una excepción en el primer nivel. Inicialmente, la muestra con una sustitución del 25% presentó un contenido proteico del 6.00%, lo que representa un ligero descenso numérico frente a la formulación testigo (7.33%). Este fenómeno sugiere un claro efecto de dilución inicial: la remoción parcial de la harina de trigo implica una pérdida directa de sus fracciones proteicas (principalmente gliadinas y gluteninas), la cual no alcanza a ser compensada de manera cuantitativa por la matriz de la leguminosa en esta baja proporción.

Por el contrario, al incrementar los niveles de sustitución, se observa un cambio drástico en la densidad nutricional del producto. A partir de las formulaciones al 65% (9.48%) y 80% (11.01%), el aporte de macromoléculas supera de manera estadísticamente significativa al del estándar comercial. Resulta particularmente destacable el desempeño de la formulación al 80%, la cual logra un incremento del 50.2% en la concentración de proteína total en comparación con el control. Este aumento trasciende la mera cantidad y representa una mejora cualitativa fundamental. Mientras que la dona convencional depende estructural y nutricionalmente del gluten del trigo una proteína caracterizada por ser deficiente en el aminoácido esencial lisina, la incorporación de la harina de chícharo subsana esta limitante.

Finalmente, esta optimización en el perfil de aminoácidos y el incremento neto de proteína transforman el propósito del producto en el mercado. Tradicionalmente, la dona es percibida como un producto de bollería de alta densidad energética y escaso aporte de macronutrientes esenciales. Sin embargo, esta reformulación la posiciona no sólo como un antojo o producto indulgente, sino como una alternativa enriquecida. Al excluir ingredientes de origen animal (como el huevo y la leche) y utilizar agua como medio fluido, el impacto nutricional recae enteramente en la leguminosa. Tal como lo señalan Hoehnel et al. (2021) respecto a la fortificación de la panificación con ingredientes de origen vegetal, la integración del chícharo permite que el producto final actúe como un vehículo eficiente para la entrega de nutrientes, consolidándose como una fuente complementaria de nitrógeno dietético de calidad superior que responde a las demandas nutricionales contemporáneas.

8.3.5. Fibra

En la Figura 10, se observa el contenido de fibra en los diferentes tratamientos. Los resultados obtenidos fueron: 4.73% para la muestra de 25%, 5.5% para la de 65% y 5.49% para la de 80%. No se incluye el tratamiento testigo en esta comparativa, ya que, por la naturaleza de su harina refinada, carece de un aporte significativo de fibra. Como señalan Gómez y Martínez (2023), a diferencia de la harina de trigo refinada cuyo proceso de molienda elimina el salvado y el germen, la harina de chícharo conserva una estructura rica en polisacáridos no almidñosos. Si bien se observa un incremento en el contenido de fibra al añadir harina de chícharo en comparación con el testigo, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones evaluadas (25%, 65% y 80%). No obstante, el contenido obtenido (promediando 5.2%) es un valor destacable para un producto de panificación que, operando en sinergia con su diseño de contenido reducido en azúcar, podría contribuir a mejorar el tránsito intestinal y favorecer un menor índice glucémico tras su consumo (Nemeš et al., 2024).

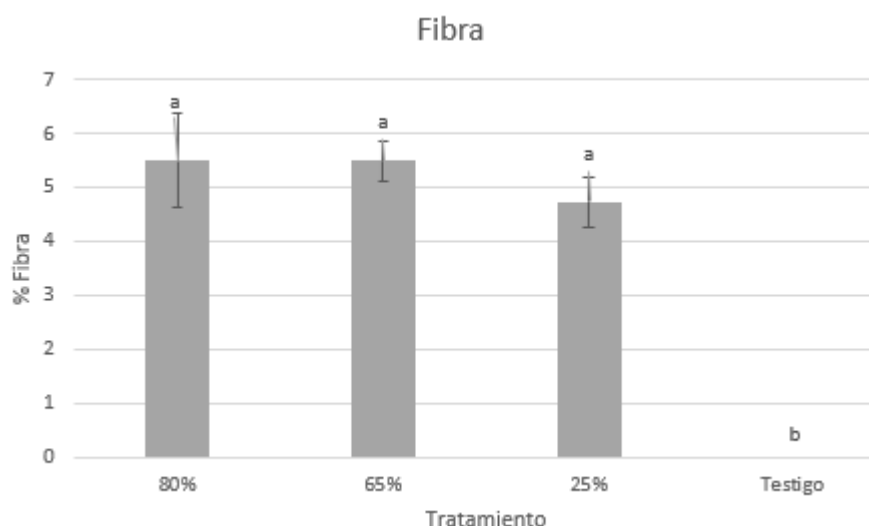


Figura 10. Comparativa del contenido graso en formulaciones de donas con harina de chícharo y muestra testigo. Nota. Los datos representan el promedio de dos réplicas independientes \pm la desviación estándar (indicada por las barras de error). Las letras distintas (a, b) sobre las barras señalan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, determinadas mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor seguido de una prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

Los resultados correspondientes a la determinación de fibra (Figura 10) muestra que la sustitución de harina de trigo por harina de chícharo (*Pisum sativum*) transforma significativamente el perfil nutricional del producto horneado. Las formulaciones experimentales presentaron contenidos de 4.73%, 5.50% y 5.49% para los niveles de sustitución del 25%, 65% y 80%, respectivamente. El tratamiento testigo fue excluido de esta comparativa analítica debido a que la harina de trigo refinada, al ser desprovista del salvado y el germen durante la molienda del endospermo, aporta cantidades virtualmente nulas de fibra dietética (Hernández, 2019).

El análisis estadístico revela un hallazgo tecnológico relevante: no existen diferencias significativas en el contenido de fibra entre las concentraciones de chícharo evaluadas. Este comportamiento indica un efecto de saturación o meseta en la matriz alimentaria. Dado que la fibra está compuesta por polisacáridos no amiláceos (celulosa, hemicelulosa y pectinas) que poseen una alta capacidad de absorción de agua (Millar et al., 2019), es probable que la competencia por la hidratación y las interacciones con la fase lipídica limiten la proporción relativa de fibra extraíble en el producto terminado. Desde el punto de vista de la ingeniería de alimentos, esto sugiere que un nivel de sustitución del 25% es el punto de optimización ideal, ya que maximiza el enriquecimiento de fibra sin necesidad de someter a la masa a las disrupciones reológicas y estructurales severas que implica una sustitución del 80%.

Finalmente, en un sistema de panificación con un diseño de contenido reducido en azúcar y donde se ha empleado agua en sustitución de los fluidos e ingredientes de origen animal (como la leche y el huevo), alcanzar un promedio de aproximadamente 5.2% de fibra representa un valor agregado sustancial. La literatura establece que la fibra dietética proveniente de leguminosas modifica favorablemente la reología del bolo alimenticio en el tracto gastrointestinal. De acuerdo con Barber et al. (2020), la presencia de estos polisacáridos incrementa la viscosidad del contenido estomacal, lo que retrasa el vaciamiento gástrico, modula la absorción de los carbohidratos disponibles y favorece un menor índice glucémico posprandial. Por lo tanto, la dona con 25% de inclusión de harina de chícharo se proyecta no sólo como un producto tecnológicamente viable, sino como un alimento funcional capaz de contribuir a la mejora del tránsito intestinal y la salud metabólica del consumidor.

8.4. Color

8.4.1 Evaluación de los Parámetros de Color (L^* , a^* , b^*)

El análisis colorimétrico reveló que la sustitución parcial con harina de chícharo (*Pisum sativum*) modifica significativamente el espectro cromático del producto, aunque preserva su luminosidad. La estabilidad en el parámetro L^* es un hallazgo tecnológicamente favorable, ya que indica que la matriz alimentaria no sufre un oscurecimiento indeseable que pudiera derivar en el rechazo por parte del consumidor, manteniendo una apariencia visualmente familiar en términos de claridad.

Sin embargo, la alteración en las coordenadas cromáticas refleja cambios fundamentales en la fisicoquímica de la cocción y en la composición de los ingredientes. La reducción significativa ($p < 0.05$) del valor a^* (tonos rojos) en las formulaciones sustituidas respecto al control (17.5 ± 0.91) sugiere una modificación en la cinética de la Reacción de Maillard y en la caramelización de los azúcares reductores entre el trigo y el chícharo, lo que atenúa la formación de melanoidinas. Esto puede atribuirse a la diferencia en el perfil de aminoácidos y azúcares rojizos-marrones características de la corteza.

Simultáneamente, la caída progresiva en el parámetro b^* (tonos amarillos) demuestra un efecto dosis-respuesta directo asociado a la concentración de la leguminosa. El valor mínimo alcanzado en la formulación al 65% (15.64 ± 2.22) confirma que la incorporación de la harina de chícharo introduce pigmentos inherentes a su especie (como trazas de clorofila). Esta interacción pigmentaria neutraliza la saturación del amarillo, resultando en un perfil de color distinto, pero predecible para sistemas panificables enriquecidos con leguminosas.

Tabla 2.

*Efecto del porcentaje de sustitución de harina de chícharo (*Pisum sativum*) sobre las coordenadas colorimétricas (L^* , a^* , b^*) del producto formulado.*

Parámetro	Testigo	25%	65%	80%
L^*	45.10 ± 8.52 ^a	43.04 ± 3.28 ^a	39.65 ± 1.33 ^a	43.27 ± 6.87 ^a
a^*	17.54 ± 0.91 ^a	14.80 ± 0.24 ^b	11.74 ± 1.58 ^b	12.28 ± 2.04 ^b
b^*	31.58 ± 3.42 ^a	23.88 ± 2.69 ^b	15.64 ± 2.22 ^d	18.73 ± 4.96 ^c

Nota. Los valores se expresan como la media ± desviación estándar (n = 18; correspondientes a 3 réplicas con 6 tomas cada una). Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (p < 0.05).

Estos hallazgos son consistentes con la literatura científica enfocada en la formulación de productos de repostería y masas fritas, como las donas, utilizando harinas no convencionales. Por ejemplo, Gómez y Martínez (2021) reportaron un comportamiento similar al sustituir harina de trigo por harina de garbanzo, observando una reducción significativa en las coordenadas a^* y b^* de la corteza. Los autores atribuyen este fenómeno a una menor concentración de azúcares reductores específicos del trigo, lo que limita la tasa de oscurecimiento por la reacción de Maillard. De manera análoga, estudios sobre la incorporación de proteínas vegetales purificadas o harinas de leguminosas en matrices ricas en carbohidratos han demostrado que la dilución de los pigmentos carotenoides naturales del trigo resulta inevitablemente en una pérdida de la saturación amarilla, llevando el producto hacia tonos más opacos o neutros (Smith et al., 2023; Vallejo & Torres, 2022).

8.5. Evaluación sensorial mediante la Prueba de Kramer

Para determinar la existencia de diferencias significativas en la preferencia de las formulaciones de donas adicionadas con harina de chícharo (*Pisum sativum*), se aplicó la prueba estadística de Kramer. De acuerdo con las tablas de valores críticos de Kramer para un nivel de significancia de 5% ($\alpha = 0.05$), se establecieron los límites de decisión en un rango de 89 a 111. Los resultados de las sumas de rangos para cada tratamiento se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Sumas de rangos y significancia estadística de las formulaciones.

Formulación	Suma de Rangos (Ri)	Interpretación Estadística
65% (723)	85	Preferencia significativa ($p < 0.05$)
25% (257)	101	Sin diferencia significativa
80% (849)	114	Rechazo significativo ($p > 0.05$)

Nota. Resultados obtenidos mediante la prueba de Kramer aplicada a un panel de 50 jueces. De acuerdo con las tablas de valores críticos para un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), los límites de decisión se establecieron en un rango de 89 a 111. Valores por debajo del límite inferior indican preferencia, mientras que valores por encima del límite superior indican rechazo.

Al analizar los datos, se observa que la formulación con 65% de sustitución obtuvo una suma de rangos de 85. Al encontrarse este valor por debajo del límite inferior crítico (89), se establece que existe una preferencia estadísticamente significativa por parte de los consumidores hacia esta muestra.

Por el contrario, la formulación con 80% presentó una suma de 114, superando el límite superior crítico (111). Esto indica un rechazo significativo de esta variante en comparación con las demás muestras evaluadas. Finalmente, la formulación con 25% obtuvo un valor de 101, el cual se sitúa dentro del intervalo de indiferencia, indicando que no posee una diferencia estadística contundente respecto a la tendencia central de preferencia del panel.

Estos resultados sugieren que un nivel intermedio de sustitución (65%) optimiza las características sensoriales del producto, superando incluso a la formulación con menor contenido de harina funcional.

9.CONCLUSIÓN

La presente investigación demuestra que la sustitución parcial de harina de trigo refinada por harina de chícharo (*Pisum sativum*) constituye una estrategia tecnológica altamente viable y pertinente para la optimización nutricional de productos de repostería. Los resultados evidencian que el incremento en la concentración de la leguminosa impacta de manera directamente proporcional en la calidad bromatológica del producto final. Específicamente, la formulación con un 80% de sustitución logró una potencialización del perfil proteico del 50.2% respecto al tratamiento testigo, además de consolidar un aporte de fibra dietética promedio del 5.2%. Considerando que este sistema de panificación posee un diseño de contenido reducido en azúcar y prescinde de ingredientes de origen animal utilizando agua como medio fluido en lugar de huevo o leche, este enriquecimiento cobra aún mayor relevancia. Esto es consistente con lo expuesto por Sá et al. (2020) y Bresciani et al. (2022), quienes destacan la capacidad de las harinas de leguminosas para complementar el perfil de aminoácidos esenciales en matrices alimentarias basadas en cereales, mejorando sustancialmente el valor biológico y respondiendo a la demanda actual por alimentos funcionales sostenibles y con menor índice glucémico.

Desde una perspectiva fisicoquímica y estructural, el aumento en los niveles de inclusión de harina funcional induce una alteración significativa en la dinámica de transferencia de masa. El pronunciado descenso de la humedad en el tratamiento al 80%, el cual registró un 36.00%, junto con el incremento del extracto etéreo en las muestras modificadas (con una diferencia de aproximadamente 8 puntos porcentuales por encima del testigo), sugieren una profunda modificación en la matriz viscoelástica y en la porosidad de la miga. En cuanto a la evaluación de los atributos físicos de calidad, la caracterización colorimétrica demostró que el parámetro de luminosidad (L^*) se mantuvo estadísticamente estable frente al control, lo que garantiza una apariencia externa congruente con las expectativas visuales del consumidor respecto a un producto horneado. No obstante, las disminuciones significativas en las coordenadas cromáticas a^* y b^* reflejan la inherente influencia de los perfiles de carotenoides y pigmentos clorofílicos de la leguminosa, así como su distinta reactividad en el pardeamiento no enzimático frente a la harina de trigo, un comportamiento respaldado por la literatura (Borsini et al., 2019).

En el ámbito de la evaluación sensorial, la prueba de Kramer fue determinante para establecer la viabilidad comercial y los límites tecnológicos de estas formulaciones. Se comprobó que el nivel de sustitución del 65% representa el punto de optimización y el umbral de aceptabilidad, logrando una preferencia estadísticamente significativa por parte del panel evaluador al situarse por debajo del límite crítico inferior de decisión. Más allá de los atributos intrínsecos del producto, estos resultados proyectan un impacto transversal y altamente positivo en la agroindustria alimentaria. Desde la perspectiva del encadenamiento productivo, la valorización del chícharo como ingrediente funcional incentiva el cultivo de leguminosas, promoviendo sistemas agroecológicos más sostenibles gracias a su capacidad de fijación biológica de nitrógeno y su menor huella hídrica frente a los cereales tradicionales. A nivel de procesamiento industrial, esta innovación cataliza el desarrollo de nuevas cadenas de valor, brindando a las empresas del sector la oportunidad estratégica de diversificar su portafolio y transitar hacia la producción de alimentos premium o de etiqueta limpia (*clean label*). Esto dinamiza la economía rural al abrir nuevos nichos de

comercialización y posiciona a la industria de la panificación frente a la creciente macrotendencia global que demanda dietas sostenibles y basadas en plantas (*plant-based*).

En conclusión, la formulación de donas horneadas con un 65% de harina de chícharo logra el equilibrio técnico, sensorial y agroindustrial idóneo. Esta proporción permite a la industria alimentaria ofrecer una alternativa innovadora que supera las limitantes nutricionales de la repostería tradicional entregando un producto con un aporte superior de proteína, fibra y minerales sin sacrificar la palatabilidad, a la vez que fomenta un modelo de producción alimentaria más rentable, diversificado y responsable con el medio ambiente.

10. REFERENCIAS

1. Akin, M., Eyduran, S. P., Milešević, J., Pavlovic, S., Orahovac, A., Vasconcelos, M. W., & Knez, M. (2025). Nutritional composition and health benefits of peas—a bibliometric research. *Frontiers in Nutrition*, 12. [cite: 169, 170]
2. Angulo-Pichardo, N., Céspedes-Morales, M., Franceschi-Calderón, C., Muñoz-Hernández, G., & Vega-Monge, J. (2024). Enfermedad Celíaca. *Acta Académica*, 74, 109–128. [cite: 121, 122]
3. Badui Dergal, S. (2019). *Química de los alimentos*. Pearson Educación. [cite: 89]
4. Bessada, S. M., Alves, R. C., & Oliveira, M. B. P. (2019). Pulses as ingredient of functional foods: Chosen case studies. En *Food Bioactives* (pp. 1-42). Springer. [cite: 43, 44]
5. Brito, A., et al. (2018). Bread Consumption Is Associated with Elevated Blood Pressure among Adults Living in Mexico City. *Nutrients*, 10(12), 1969. [cite: 113, 114]
6. Bustamante, A., Waters, A., & Reyes, M. (2021). Aplicaciones tecnológicas de las harinas de leguminosas en la industria de alimentos procesados. *Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 25(2), 45-58. [cite: 65, 66, 67]
7. Cappelli, A., Oliva, N., & Cini, E. (2020). A systematic review of gluten-free dough and bread: Dough rheology, bread characteristics, and improvement strategies. *Applied Sciences*, 10(18), 6559. [cite: 164, 165, 166]
8. Cauvain, S. P. (Ed.). (2020). *Breadmaking: Improving quality* (3.^a ed.). Woodhead Publishing. [cite: 197]
9. Celiac Disease Foundation. (2024). *Sources of gluten*. [cite: 6]
10. Cisneros-Tapia, R., et al. (2024). Technological and Nutritional Aspects of Bread Production: An Overview of Current Status and Future Challenges. *Foods*, 13(13), 2062. [cite: 115, 116]
11. Civille, G. V., Carr, B. T., & Osdoba, K. E. (2024). *Sensory Evaluation Techniques* (6th ed.). CRC Press. [cite: 184]
12. Damodaran, S., & Parkin, K. L. (2019). *Fennema y la química de los alimentos* (5ta ed.). Editorial Acribia. [cite: 93]
13. El Financiero. (3 de noviembre de 2025). Aumento del precio del pan impacta al consumo en México. [cite: 21, 22]
14. Expert Market Research. (2025). *Mexico Bread Market Size, Share, Price, Trends, Growth, Analysis, Key Players, Outlook, Report, Forecast 2025-2035*. [cite: 23, 24]
15. Flores Méndez, B., & Coronel Rodríguez, C. (2024). La dieta sin gluten cambia el perfil lipídico de los niños y adolescentes celíacos. *Revista Pediatría de Atención Primaria*, 26(103), 247–253. [cite: 123, 124]
16. García, M. (2021). *Historia de la gastronomía mexicana*. Editorial Trillas. [cite: 11]
17. Ge, J., Sun, C. X., Corke, H., Gul, K., Gan, R. Y., & Fang, Y. (2023). A

- comprehensive review of pea (*Pisum sativum* L.): Chemical composition, processing, health benefits, and food applications. *Molecules*, 28(15), 5827. [cite: 171, 172, 173]
18. Gisslen, W. (2018). *Professional baking* (7.^a ed.). John Wiley & Sons. [cite: 30]
 19. Hernández, M., & Sastre, A. (2018). *Tratado de nutrición*. Ediciones Díaz de Santos. [cite: 92]
 20. López Domínguez, Y. G., González Juárez, N., Altamirano Medina, N. P., Cano Gómez, C. I., & Wong Paz, J. E. (2025). Evaluación del potencial de la masa madre a base de harina de chícharo para la elaboración de un producto de panificación tipo hogaza. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1664. [cite: 133, 134, 135]
 21. Mayo Clinic. (2023). *Dieta sin gluten*. [cite: 5]
 22. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2021). *Legumbres: Guía nutricional y de variedades*. [cite: 88]
 23. Mordor Intelligence. (2026). *Bread Market Size, Share & Growth Research Report - 2031*. [cite: 17, 18]
 24. National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. (2020). *Definición y hechos de la enfermedad celíaca*. Institutos Nacionales de la Salud. [cite: 2, 3]
 25. Olakanmi, S. J., Jayas, D. S., & Paliwal, J. (2023). Applications of imaging systems for the assessment of quality characteristics of bread and other baked goods: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22, 2397–2425. [cite: 125, 126, 127]
 26. Padilla-Villalobos, M., Robles-Ozuna, L. E., Islas-Rubio, A. R., Ramírez-Wong, B., Heredia-Sandoval, N. G., Granados-Nevárez, M. C., & Vásquez-Lara, F. (2024). Efecto en las propiedades reológicas y texturales de pan elaborado a base de harina de trigo y harina de mijo tratada térmicamente. *Biotechnia*, 26, e2214. [cite: 139, 140, 141]
 27. Pawłowska, K., et al. (2024). The Clean Label Concept: Novel Approaches in Breadmaking. *Applied Sciences*. [cite: 119, 120]
 28. Peña-Peña, K. A., Martínez-Flores, H. E., & Rubio-Villanueva, S. C. (2022). Harina de chícharo (*Pisum sativum*): Una alternativa para el desarrollo de alimentos funcionales y sustentables. *Journal of Food Science and Nutrition*, 14(1), 112-125. [cite: 68, 69, 70]
 29. Posner, J., & Haseeb, M. (2025). Celiac disease. En *StatPearls*. StatPearls Publishing. [cite: 128]
 30. Ramos-Díaz, J. M., Su, Y., & Li, M. (2021). Effect of legume flour incorporation on color, lipid absorption, and oxidative stability of fried bakery products. *LWT - Food Science and Technology*, 141, 110931. [cite: 187, 188]
 31. World Gastroenterology Organisation. (2017). *Enfermedad celíaca*. Guías Mundiales de la Organización Mundial de Gastroenterología. [cite: 7]