



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS
DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Propiedades físicas, fisicoquímicas, fitoquímicas y microestructurales de pastas alimenticias extrudidas libres de gluten elaboradas a partir de arroz (*Oryza sativa* L.) adicionadas con harinas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.)

TESIS

Que presenta

MC. SAMUEL ARTURO DELGADO MURILLO

Para obtener el Grado de

DOCTOR EN CIENCIA

Y

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Directores

DR. JOSÉ DE JESÚS ZAZUETA MORALES

DR. CARLOS IVÁN DELGADO NIEBLAS

Culiacán, Sinaloa, México

junio de 2024



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



El presente trabajo de investigación, titulado “**Propiedades físicas, fisicoquímicas, fitoquímicas y microestructurales de pastas alimenticias extrudidas libres de gluten elaboradas a partir de arroz (*Oryza sativa* L.) adicionadas con harinas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.)**”, se llevó a cabo en los Laboratorios de Procesos Térmicos, Análisis Funcionales y Caracterización Fisicoquímica y Reológica pertenecientes al Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Se encontró bajo la dirección del Dr. José de Jesús Zazueta Morales y del Dr. Carlos Iván Delgado Nieblas, además de contar con la asesoría de la Dra. Irma Leticia Camacho Hernández, Dra. Xóchitl Ariadna Ruiz Armenta y del Dr. Armando Quintero Ramos (Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH)). El proyecto recibió financiamiento del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación de la Universidad Autónoma de Sinaloa (PROFAPI-2022, PRO_A7_018). El Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) proporcionó beca para estudios de Doctorado del M. C. Samuel Arturo Delgado Murillo.

Agradecimientos

Le agradezco a **Dios** por haberme guiado a lo largo de todo este tiempo, por las bendiciones recibidas y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (**CONAHCyT**) por el apoyo económico brindado a través de la beca.

Al Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación de la Universidad Autónoma de Sinaloa (**PROFAPI-2022, PRO_A7_018**) por el apoyo económico otorgado para el desarrollo del presente trabajo.

A la **Facultad de Ciencias Químico Biológicas** de la Universidad Autónoma de Sinaloa, así mismo al **Doctorado en Ciencia y Tecnología en Alimentos** por abrirme sus puertas y aceptarme en este programa, por permitirme formarme como profesional dentro de sus instalaciones.

A mis directores de tesis **Dr. José de Jesús Zazueta Morales** y **Dr. Carlos Iván Delgado Nieblas** gracias por dirigirme de manera adecuada durante la investigación, por siempre tener tiempo para atenderme, por las grandes enseñanzas y la paciencia brindada.

Al **Dr. Armando Quintero Ramos** por la gran asesoría que ayudo a enriquecer este proyecto, así como por la confianza brindada

A la **Dra. Xóchitl Ariadna Ruiz Armenta** por su gran apoyo en todo momento, por compartir su experiencia y la amistad brindada.

Al **Ing. Gustavo Alfaro Rojo** director de la empresa Macfrut por la donación de la harina de garbanzo extrudido utilizada en el presente estudio.

A mis compañeros y amigos de laboratorio **Christian, Marina y Fredy** por todos sus consejos, por su apoyo brindados y especialmente por hacer más divertido la estancia en el laboratorio, de manera muy especial le agradezco a **Yazmín** por ser una de las mejores compañeras y amigas que pude conocer, por su apoyo, paciencia y siempre motivarme a salir adelante.

De una manera muy especial le doy gracias a las mujeres más importantes de mi vida, a mi mamá **Rosa Murillo**, mi tía **Juanis Murillo**, mi abuela **Rosa Mendez** y mi hermana **María Delgado** por siempre estar a mi lado en todo este proceso de crecimiento profesional y personal, por su apoyo y cariño incondicional y sobre todo por siempre creer en mí y mis capacidades.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	xviii
I. RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II. INTRODUCCIÓN	5
III. REVISIÓN DE LITERATURA	7
A. PASTAS ALIMENTICIAS	7
1. Origen	8
2. Clasificación de pastas alimenticias	9
a. Por su composición	9
b. Por su forma y terminación	10
3. Producción de pastas alimenticias	10
4. Composición de pastas alimenticias	12
5. Pastas libres de gluten	12
B. ENFERMEDAD CELÍACA	14
1. Generalidades	14
2. Síntomas y tratamiento	16
3. Gluten	16
C. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DE PASTAS ALIMENTICIAS	17
1. Arroz (<i>Oryza sativa</i> L.)	17
a. Generalidades del arroz	17
b. Producción de arroz	18
c. Composición química del arroz	20
2. Garbanzo (<i>Cicer arietinum</i> L.)	22
a. Generalidades del garbanzo	22
b. Producción de garbanzo	23
c. Composición química del garbanzo	23
D. MÉTODOS DE ELABORACIÓN DE PASTAS	26

1. Laminación	26
2. Extrusión	26
IV. JUSTIFICACIÓN	31
V. HIPÓTESIS	32
VI. OBJETIVOS	33
A. Objetivo general	33
B. Objetivos específicos	33
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	35
A. MATERIALES	35
1. Materias primas	35
B. MÉTODOS	35
1. Proceso de extrusión	35
2. Métodos analíticos	36
a. Caracterización de las materias primas	36
1) Composición proximal	36
2) Tamaño de partícula	36
3. Métodos fisicoquímicos	38
a. Índice de expansión (IE)	38
b. Densidad aparente (DA)	38
c. Índice de absorción de agua (IAA)	39
d. Índice de solubilidad en agua (ISA)	39
e. Parámetros de color	40
4. Propiedades de cocción	40
a. Tiempo de cocción (TC)	40
b. Aumento de peso (AP)	41
c. Aumento de volumen (AV)	41
d. Pérdidas de sólidos por cocción (PSC)	41
5. Métodos fitoquímicos y funcionales	42
a. Carotenoides totales (CT)	42
1) Extracción	42
2) Determinación de carotenoides totales	42

b. Extracción de fitoquímicos	43
1) Extracto de fitoquímicos libres	43
2) Extracto de fitoquímicos ligados	43
c. Compuestos fenólicos	44
1) Curva de calibración	44
2) Determinación del contenido de compuestos fenólicos libres, ligados y totales	44
d. Actividad antioxidante ABTS	45
1) Extracción	45
2) Medición de la actividad antioxidante	45
e. Actividad antioxidante DPPH	46
1) Extracción	46
2) Curva de calibración	46
3) Medición de la actividad antioxidante	46
f. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo (Deoxi-D-Ribosa)	47
6. Métodos de determinación del efecto biológico	48
a. Inhibición de la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL)	48
7. Métodos estadísticos	49
a. Diseño experimental	49
b. Análisis de datos	52
c. Optimización del proceso	52
8. Fibra dietaria	52
9. Métodos nutrimentales	53
a. Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	53
b. Perfil de aminoácidos	54
c. Perfil de minerales	54
10. Métodos microestructurales	55
a. Microscopía electrónica de barrido (MEB)	55
b. Difracción de rayos X y cristalinidad relativa	55
11. Estudio <i>in vivo</i> del índice glicémico	56

12. Detección de gliadinas	57
13. Análisis sensorial	58
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
A. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	60
1. Composición proximal	60
2. Tamaño de partícula de las materias primas	60
3. Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA) de las materias primas	63
B. ESTUDIO PRELIMINAR DE EXTRUSIÓN	65
C. ESTUDIO DE EXTRUSIÓN.	66
1. Análisis físicos y fisicoquímicos	67
a. Índice de expansión (IE)	67
b. Índice de absorción de agua (IAA)	72
c. Índice de solubilidad en agua (ISA)	76
d. Parámetro de color L (L*)	79
e. Parámetro de color b (b*)	82
f. Diferencia total de color (ΔE)	85
2. Pruebas de cocción	87
a. Tiempo de cocción (TC)	87
b. Aumento de peso (AP)	93
c. Aumento de volumen (AV)	95
d. Pérdidas de sólidos por cocción (PSC)	98
3. Análisis fitoquímicos, funcionales y biológicos	102
a. Carotenoides totales (CT)	102
b. Compuestos fenólicos totales (CFT)	107
c. Actividad antioxidante ABTS total (ABTST)	110
d. Actividad antioxidante DPPH total (DPPHT)	112
e. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo libres (DeoxiLib)	115
f. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo ligados (DeoxiLig)	119
g. Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad libres (LDLLib)	122

h. Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad ligados (LDLLig)	125
4. Optimización del proceso de extrusión	128
5. Fibra dietaria (FD)	138
6. Análisis nutrimentales	141
a. Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	141
b. Perfil de aminoácidos	144
c. Perfil de minerales	146
7. Métodos microestructurales	147
a. Microscopía electrónica de barrido (MEB)	147
b. Difracción de rayos X y cristalinidad relativa	152
8. Estudio in vivo del índice glicémico	156
9. Detección de gliadinas	161
10. Análisis sensorial	163
IX. CONCLUSIONES	168
X. BIBLIOGRAFÍA	170
ABREVIATURAS	190

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Diferentes formas y terminaciones de pastas alimenticias.	11
2	Atrofia de las vellosidades intestinales por la enfermedad celiaca.	15
3	Partes constitutivas del grano de arroz	19
4	Métodos de elaboración de pastas: A. Método de laminación; B. Método de extrusión.	27
5	Etapas de procesamiento para la obtención de pastas alimenticias libres de gluten a partir de arroz quebrado y garbanzo extrudido y materiales obtenidos en las diferentes etapas (A) mezcla, (B) extrusión, (C) cocción.	37
6	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre el índice de expansión (IE) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.	71
7	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) sobre el índice de absorción en agua (IAA) (TE) 107 °C) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.	74

- 8** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre el índice de solubilidad en agua (IAA) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos. 77
- 9** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) sobre el parámetro de color luminosidad (L*) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos. 81
- 10** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el parámetro de color b* de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos. 84
- 11** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la diferencia total de color (ΔE) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos. 86
- 12** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG)(TE= 107 °C) sobre el tiempo de cocción (TC) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos. 91

13	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el aumento de peso (AP) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.	94
14	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el aumento de volumen (AV) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.	97
15	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre la pérdida de sólidos por cocción (PSC) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.	100
16	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el contenido de carotenoides totales (CT) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). A, superficies y B, contornos.	106
17	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.	109
18	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la actividad antioxidante ABTS total	111

- (ABTST) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm).
A, superficies y B, contornos.
- 19** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la actividad antioxidante DPPH total (DPPHT) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm).
A, superficies y B, contornos. 114
- 20** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre la inhibición de oxidación del radical OH de extractos libres (DeoxiLib) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos. 117
- 21** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la inhibición de oxidación por el radical OH de extractos ligados (DeoxiLig) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos. 121
- 22** Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la inhibición de oxidación de las LDL de extractos libres (LDLLib) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). A, superficies y B, contornos. 124
- 23** Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la inhibición de oxidación de las LDL de 126

	extractos ligados (LDLLig) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). A, superficies y B, contornos.	
24	Deseabilidad individual y global (combinada) de las variables de proceso y respuestas analizadas durante la optimización.	130
25	Digestibilidad proteínica in vitro (PCA= pasta comercial de arroz; PC= pasta control de arroz; PO= pasta óptima de arroz y garbanzo).	143
26	Microscopía electrónica de barrido (MEB) de la materia prima harina de arroz quebrado (A, C y E), y harina de garbanzo extrudido (B y D) utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias a diferentes niveles de aumento (100x, 250x y 500x).	149
27	Microscopía electrónica de barrido (MEB) de las pastas alimenticias obtenidas en condiciones óptimas (PO) sin procesar (A, C y F), procesadas (B, D y G), y pasta control (PC) procesada (E y H) a diferentes niveles de aumento (100x, 250x y 500x).	151
28	Patrones de difracción de rayos X de las materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas alimenticias, (A) harina de arroz quebrado. (B) harina de garbanzo extrudido.	153
29	Cambios en los patrones de difracción de rayos X de las pastas alimenticias en sus diferentes etapas de procesamiento, (A) pasta control sin procesar a base de arroz quebrado. (B) pasta	154

control procesada, (C) pasta óptima sin procesar a base de arroz quebrado y garbanzo extrudido, (D) pasta óptima procesada.

- 30** Concentraciones medias de glucosa en sangre en sujetos sanos después de la ingesta de pan blanco, pasta control cocida (PC) y pasta óptima cocida (PO). 158
- 31** Análisis de frecuencia de la prueba de aceptabilidad general (1= me disgusta extremadamente, 2= me disgusta mucho, 3= me disgusta moderadamente, 4= me disgusta, 5= ni me gusta ni me disgusta, 6= me gusta, 7= me gusta moderadamente, 8= me gusta mucho, 9= me gusta extremadamente) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz quebrado y garbanzo extrudido; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial a base de arroz). 164
- 32** Análisis de frecuencia de la prueba de aceptabilidad por atributos (A= color, B= sabor, C= textura) (1= me disgusta extremadamente, 2= me disgusta mucho, 3= me disgusta moderadamente, 4= me disgusta, 5= ni me gusta ni me disgusta, 6= me gusta, 7= me gusta moderadamente, 8= me gusta mucho, 9= me gusta extremadamente) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz 165

quebrado y garbanzo extrudido; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial a base de arroz).

- 33** Análisis de frecuencia de la probabilidad de compra (1= si la compraría, 2= probablemente si la compraría, 3= tal vez la compraría, 4= probablemente no la compraría, 5= no la compraría) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz quebrado y garbanzo extrudido; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial a base de arroz). 167

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
1	Composición proximal por 100 g de pasta convencional seca.	13
2	Composición proximal del arroz con cáscara (palay), integral y pulido.	21
3	Composición proximal del garbanzo	25
4	Diseño experimental central compuesto rotatable, de tres variables independientes temperatura de extrusión (X1, TE), velocidad de tornillo (X2, VT) y contenido de harina de garbanzo extrudido (X3, HG) ($\alpha = 1.682$).	50
5	Diseño experimental del estudio de extrusión de tres factores	51
6	Composición química (base seca) de las materias primas utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten mediante el proceso de extrusión.	61
7	Distribución de tamaño de partícula de las materias primas utilizadas en el proceso de extrusión (A: harina de arroz quebrado y B: harina garbanzo extrudido).	62
8	Índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua de las materias primas utilizadas en el proceso de extrusión para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten.	64
9	Análisis de varianza de las respuestas físicas y fisicoquímicas de las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de garbanzo extrudido.	68

10	Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las respuestas físicas y fisicoquímicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.	69
11	Análisis de varianza de las pruebas de cocción evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas a partir de harina de arroz quebrado y harina de garbanzo extrudido.	88
12	Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las pruebas de cocción evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.	90
13	Análisis de varianza de las respuestas fitoquímicas, funcionales y biológicas de las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de garbanzo extrudido.	103
14	Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las variables de respuesta fitoquímicas y funcionales evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.	104
15	Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las variables de respuesta biológicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.	116
16	Criterios y límites utilizados para la optimización del proceso de extrusión en la obtención de pastas alimenticias libres de	129

	gluten a partir de harinas de arroz quebrado y garbanzo extrudido.	
17	Valores predichos por el modelo y experimentales de las variables utilizadas en la optimización de pastas libres de gluten a base de harina de arroz quebrado y garbanzo extrudido.	132
18	Composición química (% b.s.) y valor energético (kcal/100g) de las pastas alimenticias.	134
19	Valores experimentales de las propiedades físicas, fisicoquímicas, y de cocción evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento.	136
20	Características fitoquímicas y biológicas de las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento.	137
21	Contenido de fibra dietaria y digestibilidad proteínica in vitro de las materias primas utilizadas en la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten.	139
22	Contenido de fibra dietaria y digestibilidad proteínica in vitro de la pasta control (PC) y pasta obtenida bajo condiciones óptimas de procesamiento (PO) en las diferentes etapas de procesamiento (mezcla sin extrudir (MSI) y pasta extrudida (PE), además de la pasta comercial de arroz (PCA).	140

23	Perfil de aminoácidos esenciales ¹ y calificación química en la mezcla sin procesar y pasta obtenida en las condiciones óptimas de procesamiento.	145
24	Contenido de minerales de pastas alimenticias libres de gluten obtenidas de condiciones óptimas de procesamiento (PO), y requerimientos de ingesta diaria.	148
25	Características e indicadores bioquímicos de admisión de los participantes en el estudio in vivo.	157
26	Índice glicémico (IG) y carga glicémica de pasta control (PC) y pasta óptima (PO)	160
27	Detección de gliadinas de pasta control (PC), pasta óptima (PO), pasta comercial de arroz (PCA) y pasta comercial de sémola de trigo (PCST) en sus diferentes etapas de procesamiento.	162

I. RESUMEN

En la actualidad se busca desarrollar productos sin gluten que satisfagan las necesidades de consumidores con enfermedad celíaca. Una alternativa es la elaboración mediante el proceso de extrusión de pastas alimenticias (PA) a partir de arroz quebrado (*Oryza sativa* L.) y garbanzo extrudido (*Cicer arietinum* L.), ya que que no contienen gluten y poseen características nutricionales y compuestos bioactivos de interés. El objetivo del presente estudio fue estudiar el efecto del proceso de extrusión sobre propiedades físicas, fisicoquímicas, fitoquímicas, nutrimentales y microestructurales de PA elaboradas con arroz quebrado y garbanzo extrudido, evaluándose el efecto de los factores de estudio, temperatura de extrusión (TE, 90.18-123.8 °C), velocidad de tornillo (VT, 76.6-157.3 rpm), y contenido de garbanzo extrudido (CG, 0.23-23.7 %). Para el análisis estadístico de los datos se utilizó un diseño central compuesto rotatable. En las PA, los valores de índice de expansión aumentaron combinando bajas TE y VT, con bajos CG. Asimismo, los valores de índice de absorción de agua aumentaron a bajas TE y altas VT en todo el rango de CG. Los valores de índice de solubilidad en agua aumentaron combinando altos CG con altas TE y bajas VT. El parámetro L^* de color disminuyó, mientras que el parámetro b^* aumentó a altos CG, mientras que el ΔE aumentó a altas TE. El tiempo de cocción disminuyó combinando altas TE y CG. El aumento de peso y aumento de volumen se incrementaron en dos zonas, una combinando bajas TE con altos CG, y la otra combinando altas TE con bajos CG. Las pérdidas de sólidos por cocción disminuyeron a CG intermedios en todo el rango de TE y VT. El contenido de carotenoides totales se incrementó combinando bajas VT con altos CG. El contenido de compuestos fenólicos totales aumentó a altos CG y TE. La actividad antioxidante ABTS y DPPH total

aumentó combinando altas TE y CG. La inhibición de oxidación del radical OH de extractos libres, inhibición de oxidación del radical OH de extractos ligados, e inhibición de oxidación de las LDL aumentó a altos CG. Las condiciones óptimas de procesamiento fueron: TE= 117 °C, VT= 134.4 rpm, y CG= 12.57 %. Al comparar en la validación los valores experimentales obtenidos contra los valores predichos por los modelos matemáticos estos fueron muy similares. La pasta óptima (PO) presentó mayor contenido de fibra dietaria (FD), así como mayor digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) comparada a una pasta control (PC) y una pasta comercial de arroz (PCA). Asimismo, el proceso de extrusión incrementó la FD, DPIV, contenido de aminoácidos esenciales (excepto histidina y metionina) comparado a la mezcla sin procesar. En el análisis de minerales, la PO presentó menores valores de sodio que una PCA. Asimismo, a partir de las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido se observaron en la PO gránulos de almidón parcialmente fragmentados. La PO presentó un patrón de difracción de rayos X tipo V característico de alimentos extrudidos. Asimismo, PO con adición de 12.57 % de garbanzo mostró un menor índice glicémico comparada con una PC elaborada solamente con arroz. En el análisis de gliadinas en PO se presentó un resultado negativo, con lo cual se obtuvo un alimento sin gluten. En el análisis sensorial, PO mostró una buena aceptabilidad general cercana a la PCA. Los resultados del presente estudio indican que es posible producir PA libres de gluten utilizando de harinas de arroz quebrado y garbanzo con aceptables propiedades fisicoquímicas, fitoquímicas, antioxidantes, nutrimentales y sensoriales, cuyo consumo podría tener beneficios en la salud de los consumidores.

ABSTRACT

Currently, efforts are being made to develop gluten-free products that meet the needs of consumers with celiac disease. An alternative is the preparation through the extrusion process of pasta from broken rice (*Oryza sativa* L.) and extruded chickpea (*Cicer arietinum* L.) since they do not contain gluten and have nutritional characteristics and bioactive compounds of interest. The objective of the present study was to study the effect of the extrusion process on physical, physicochemical, phytochemical, nutritional and microstructural properties of pasta made with broken rice and extruded chickpea, evaluating the effect of the study factors, extrusion temperature (ET, 90.18 - 123.8 °C), screw speed (SS, 76.6-157.3 rpm), and extruded chickpea content (CHC, 0.23-23.7%). A central composite rotatable experimental design was used for statistical analysis of the data. The expansion index values in pasta increased, combining low ET and SS, with low CHC. Likewise, water absorption index values increased at low ET and high SS throughout the CHC range. The water solubility index values increased by combining high CHC with high ET and low SS. The color L* parameter decreased, whereas the b* parameter increased at high CHC, while ΔE increased at high ET. The coking time decreased by combining high ET and CHC. The weight gain and volume gain increased in two areas: low ET with high CHC and high ET with low CHC. The cooking loss decreased at intermediate CHC throughout the range of ET and SS. The total carotenoid content was increased by combining low SS with high CHC. The total phenolic compounds content increased at high CHC and ET. The ABTS and total DPPH antioxidant activity increased by combining high ET and CHC. The inhibition of OH radical oxidation from free extracts, inhibition of OH radical oxidation from bound extracts, and inhibition of LDL oxidation increased at high CHC.

The optimal processing conditions were: ET= 117 °C, SS= 134.4 rpm, and CHC= 12.57 %. In the validation, when comparing the experimental values obtained against the predicted values by the mathematical models, they were very similar. The optimal pasta (OP) presented higher dietary fiber content (DF), as well as higher in vitro protein digestibility (IVPD) compared to a control pasta (CP) and a commercial rice pasta (CRP). Likewise, the extrusion process increased the DF, IVPD, and essential amino acid content (except histidine and methionine) compared to the unprocessed mixture. The OP presented lower sodium values than CRP in the mineral analysis. Likewise, partially fragmented starch granules were observed in the OP from the micrographs obtained by scanning electron microscopy. The OP presented a type V X-ray diffraction pattern characteristic of extruded foods. Likewise, OP, adding 12.57% chickpea extruded flour, showed a lower glycemic index than the CP made only with rice. A negative result was presented in the analysis of gliadins in OP, which resulted in a gluten-free food. In the sensory analysis, OP showed good general acceptability close to CRP. The results of the present study indicate that it is possible to produce gluten-free pasta using broken rice and chickpea flours with acceptable physicochemical, phytochemical, antioxidant, nutritional, and sensory properties, whose consumption could have health benefits for consumers.

II. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el desarrollo y consumo de alimentos funcionales ha venido creciendo debido al incremento en las expectativas del consumidor, exigiendo productos alimenticios con mayor aporte nutrimental, con potenciales beneficios a la salud, tal es el caso de los alimentos libres de gluten. Los alimentos libres de gluten son alimentos dirigidos especialmente a aquellas personas que padecen la enfermedad celíaca, presentando una intolerancia permanente al gluten y proteínas afines, y produciendo una severa atrofia de las vellosidades del intestino.

En los últimos años los casos de intolerancia al gluten se han incrementado a nivel mundial. En México, según la Asociación Celíaca, se estima que uno de cada 140 habitantes puede padecer dicha enfermedad, sin haber sido diagnosticados (Chávez-Barrera y col 2015).

Las pastas alimenticias, son productos ampliamente aceptados entre la población debido a su bajo costo, fácil preparación, versatilidad, atributos sensoriales adecuados y una larga vida de anaquel (Torres y col 2007). Las pastas tradicionales compuestas esencialmente por trigo y/o sémola de trigo son consideradas excelentes vehículos para la incorporación de compuestos bioactivos. Sin embargo, el trigo contiene altas cantidades de gluten, el cual es un compuesto intolerante para las personas que padecen la enfermedad celíaca, por lo que se ha propuesto la elaboración de pastas libres de gluten (Granito y col 2003).

Por lo anterior, se está buscando el desarrollo de alimentos funcionales para aumentar el valor nutricional de los alimentos libres de gluten, esto mediante la mezcla de cereales con leguminosas, para favorecer el incremento del valor biológico de las

proteínas. Uno de los cereales que ha sido utilizado para la sustitución del trigo en las pastas alimenticias es el arroz, debido a que este es considerado un cereal hipoalergénico y de sabor suave (neutro), lo cual favorece la combinación de éste con otras materias primas. Una alternativa sustentable es la utilización de arroz quebrado, el cual se obtiene como subproducto durante el proceso de pulimiento del arroz. Este subproducto es adecuado para el consumo humano con características nutrimentales y sensoriales idénticas al arroz pulido, pero con bajo costo económico.

Por su parte, el garbanzo es una rica fuente de proteínas y fibra dietaria, complementándose así con cereales como el arroz, cubriéndose las deficiencias de aminoácidos esenciales entre ellos, y favoreciéndose la obtención de productos con proteínas de alto valor biológico. Además, el garbanzo es considerado una rica fuente de compuestos bioactivos (López-Padrón y col 2021), obteniéndose así una pasta con alta calidad nutrimental/nutracéutica.

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue estudiar los efectos del procesamiento por extrusión en las características fisicoquímicas, fitoquímicas, nutrimentales, y microestructurales de pastas alimenticias libres de gluten producidas a partir de arroz quebrado (*Oryza sativa* L.) y garbanzo (*Cicer arietinum* L.) extrudido.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

A. PASTAS ALIMENTICIAS

Se define con el nombre de pasta alimenticia tradicional a los productos obtenidos mediante la elaboración, laminación, y secado de una masa preparada, respectivamente, solamente con sémola de trigo duro y agua, o bien con sémola de trigo duro de baja calidad y agua (UNAFPA 2012). Estos productos se someten a un proceso de prensado o extrusión con un posterior secado o deshidratación del producto (Feijoo y col 2018).

Las pastas alimenticias, de acuerdo al Codex Stan 192-1995 de la Norma General del Codex alimentario, son productos sin tratamiento (esto es, que no presentan calentamiento, ni están hervidos, cocidos, pregelatinizados o congelados), únicamente deshidratados, elaborándose a partir de sémola de trigo y agua, consumiéndose poco tiempo después de prepararse.

Las pastas alimenticias se encuentran en primer lugar en el listado de las diez comidas más populares del mundo. Esta aceptación global de las pastas tendría que ver con su versatilidad, fácil preparación y bajos costos (Lezcano 2016). La pasta de sémola de trigo es un alimento de consumo masivo, debido a su bajo costo y facilidad de preparación, sin embargo, es un alimento nutricionalmente no balanceado ya que su contenido de grasa, fibra dietética y vitaminas es escaso (Avendaño y col 2017).

Debido a su gran difusión, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Food and Drug Administration (FDA), consideran que la pasta es un buen vehículo para la adición de nutrientes, ayudando a mejorar la salud de los consumidores (Foschia y col 2013). Para mejorar las propiedades nutricionales de pastas, se han realizado estudios

para suplementarla con fibra dietaria, proteínas, vitaminas y minerales, o reemplazando la sémola de trigo duro con la utilización de harinas de alimentos como chícharo, garbanzo, frijol, trigo sarraceno, mijo perlado, cacahuete, amaranto, quínoa, y avena, entre otras. Sin embargo, la sustitución de la sémola supone un reto tecnológico, ya que el gluten contribuye al desarrollo de la masa y previene la disgregación de la pasta durante la cocción en agua caliente, es decir, proporciona propiedades estructurales difíciles de sustituir que consiguen mantener la calidad de la pasta durante su manipulación (Moreno-Aznar 2019).

1. Origen

Su origen ha causado alta controversia, ya que se ha reportado que culturas como la italiana, china, griega y medio oriente fueron las iniciadoras en la producción de este alimento de alto consumo.

Existen varias teorías presentadas relacionadas a su origen. En algunas investigaciones se adjudica su descubrimiento a Marco Polo en el siglo trece, que pudo haberla introducido en Italia al regresar de sus viajes a China. Otra teoría menciona que su origen es más antiguo, remontándose a civilizaciones etruscas, quienes producían pastas triturando diferentes cereales y granos, mezclándose con agua, en donde posteriormente eran cocidos produciéndose alimentos sabrosos y nutritivos. Durante el siglo XIX el consumo de pasta seca se extendió rápidamente entre toda la sociedad italiana, el cual se puso de moda y su ofrecimiento a los invitados se convirtió en un signo de distinción (IPO 2023).

2. Clasificación de pastas alimenticias

La pasta ha evolucionado en un gran número de variedades y formas, según los lugares su nombre puede variar y en ocasiones se utiliza un solo nombre para referirse a distintas formas (Mataix–Verdú 2005). En términos generales, las pastas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

a. Por su composición

De acuerdo con Ortega-Micó (2016), en base a los ingredientes que constituyen a las pastas alimenticias, estos productos se pueden clasificar en:

- Pastas alimenticias simples: son las que han sido elaboradas con la sémola, harina o semolina procedentes del trigo duro, semiduro, blando o una mezcla de ambos.
- Pastas alimenticias compuestas: son aquellas en las que en su proceso de elaboración han sido enriquecidas con huevo, leche, hortalizas, gluten, soya, verduras y leguminosas.
- Pastas alimenticias rellenas: pueden ser simples o compuestas, la característica de estas pastas es que están rellenas con un preparado, como los raviolos y los tortelines, contienen carnes y quesos en su interior.
- Pastas alternativas: Son aquellas pastas elaboradas a base de una materia prima distinta a la sémola de trigo o harinas derivadas del trigo, enriquecidas o no con otras materias primas. Dentro de estas se encuentran los fideos de arroz.

b. Por su forma o terminación

Las formas y terminaciones más conocidas y usuales son: macarrones, espaguetis, tallarines, espirales, placas de pasta y raviolis (**Figura 1**) (Gil-Martínez 2010).

- Macarrones: Pasta alimentaria de origen napolitano de forma cilíndrica hueca, con un diámetro aproximado de un cm. Pueden ser más o menos largos.
- Espaguetis: Pasta alimentaria originaria de Nápoles, con largos cilindros macizos y muy finos. En un principio de fabricación casera, empezaron a comercializarse en el renacimiento al mismo tiempo que los macarrones. De fácil cocción, se preparan de múltiples maneras, combinando con un sinfín de condimentos.
- Tallarines: Cintas de pasta planas, largas y anchas (llegan a tener un cm de ancho). Tienen diferentes colores dependiendo de los ingredientes que los compongan y se utilizan como primer plato y como guarnición debido a su forma.
- Espirales: Tienen forma de hélice y tamaño corto y se presentan en el mercado con diferentes colores y sabores. Son ideales como primer plato, en ensaladas o como acompañamiento.

3. Producción de pastas alimenticias

La producción de pastas alimenticias en el mundo en el año 2022 fue alrededor de 16.9 millones de toneladas (t), siendo los principales países productores Italia, Estados Unidos y Brasil. En México, fue reportada una producción de 330,000 t, aportando así



Figura 1. Diferentes formas y terminaciones de pastas alimenticias. (Gil-Martínez 2010).

un 1.95% de la producción total a nivel mundial ubicándose en el noveno lugar de producción (IPO 2023).

Por otro lado, los principales países consumidores per cápita de este producto fueron Italia, Túnez, Venezuela, Grecia y Perú con un consumo per cápita de 25.5, 17, 15, 12.2 y 9.9 kg, respectivamente. México se ubicó en el lugar 40 con un consumo per cápita de 2.7 kg (IPO 2023).

4. Composición de pastas alimenticias

Las pastas alimenticias tradicionales o simples, son aquellas que se elaboran a partir de sémola de trigo duro, agua y sal. El valor energético de la pasta tradicional es de aproximadamente 350 Kcal/100 g y el aporte de nutrientes está relacionado con la variedad de trigo, las condiciones de cultivo y el grado de extracción del grano, que en el caso de los productos para elaboración de pastas suele ser bajo (70%) (Gil 2010). De manera general, los carbohidratos (almidón) son los nutrientes más abundantes (79.1%) (**Cuadro 1**). Una proteína abundante de la pasta es el gluten, que le confiere la elasticidad típica, siendo su contenido medio de proteínas de 12-13%, por lo que se puede considerar una fuente adecuada de proteína (Gil 2010). Cabe mencionar que su proteína presenta un valor biológico bajo, originado por las deficiencias de lisina (Varela y col 2019).

5. Pastas libres de gluten

A nivel mundial los productos libres de gluten han tenido un incremento sin precedente en los últimos años (Foschia y col 2016). Entre las razones que explican el aumento de casos en patologías relacionadas con el consumo de gluten (enfermedad celíaca), son las siguientes: sensibilidad no celíaca al gluten y alergia al

Cuadro 1. Composición química proximal por 100 g de pasta convencional seca.

Nutrientes	Contenido por 100 g
Energía (Kcal)	350 ^a
	345.8 ± 0.9 ^b
	330.12 ^d
	362.71 ^e
Humedad (g)	10.55 ^a
	10.95 ± 0.1 ^b
	8.55 ± 0.1 ^c
	9.37 ^e
Proteínas (g)	10.9-13.8 ^a
	13.37 ± 0.04 ^b
	9.75 ± 0.01 ^c
	14.40 ^d
Grasas (g)	14.8 ± 0.37 ^e
	1.4-1.8 ^a
	0.5 ± 0.02 ^b
	2.44 ± 0.05 ^c
Carbohidratos (g)	0.96 ^d
	0.07 ± 0.01 ^e
	71.9-79.1 ^a
	69.67 ± 0.4 ^b
Fibra dietaria soluble (g)	75.98 ^c
	65.97 ^d
	75.76 ^e
	2.84 ± 0.3 ^b
Fibra dietaria insoluble (g)	0.74 ± 0.08 ^e
	1.71 ± 0.25 ^b
Fibra dietaria total (g)	3.96 ± 0.03 ^e
	2.9 ^a
Cenizas (g)	4.55 ± 0.56 ^b
	2.5 ± 0.3 ^c
	4.16 ^d
	4.73 ± 0.05 ^e
	0.96 ± 0.01 ^b
	0.78 ± 0.05 ^c
	0.93 ^d
	0.56 ± 0.03 ^e

Fuente: (Gil 2010)^a; (Zarzycki y col 2020)^b; (Jiménez-Vera y col 2018)^c; (Granito y col 2003)^d y (Torres y col 2007)^e.

trigo, además de un grupo creciente de personas, aparentemente sanas, que optan por una dieta libre gluten por ser considerada más saludable (Estévez y Araya 2016).

Por consiguiente, se han buscado diversas alternativas de alimentos que no ocasionen daños a la salud de los consumidores con dichos padecimientos, siendo las pastas alimenticias sin gluten una alternativa viable. Estas pastas alimenticias son elaboradas con ingredientes libres de gluten, con la finalidad de brindar al consumidor la garantía de un producto apto para personas celiacas, alérgicas y/o sensibles al gluten (Cespedes, 2020).

Diversos autores han trabajado con diferentes formulaciones para producir pastas alimenticias libres de gluten, tal es el caso de Sobukola y col 2012 quienes elaboraron una pasta a base de ñame blanco y grano cervicero (5-15 %) obteniendo pastas alimenticias libres de gluten con buenas características fisicoquímicas y de cocción.

B. ENFERMEDAD CELÍACA

1. Generalidades

La enfermedad celíaca radica en una intolerancia permanente a la gliadina y otras proteínas afines, que origina una severa atrofia de las vellosidades del intestino (**Figura 2**). Se conoce, que para que se exprese esta intolerancia, se requiere la concurrencia de factores genéticos, inmunológicos y medioambientales (Panisello 2004).

La enfermedad celíaca (EC), es también conocida como “enteropatía sensible al gluten”, que es una proteína encontrada en el trigo, centeno, avena y cebada (Karlín y col 2016). Esta enfermedad puede definirse como una inflamación crónica en la mucosa del intestino delgado mediada inmunológicamente, donde el paciente puede

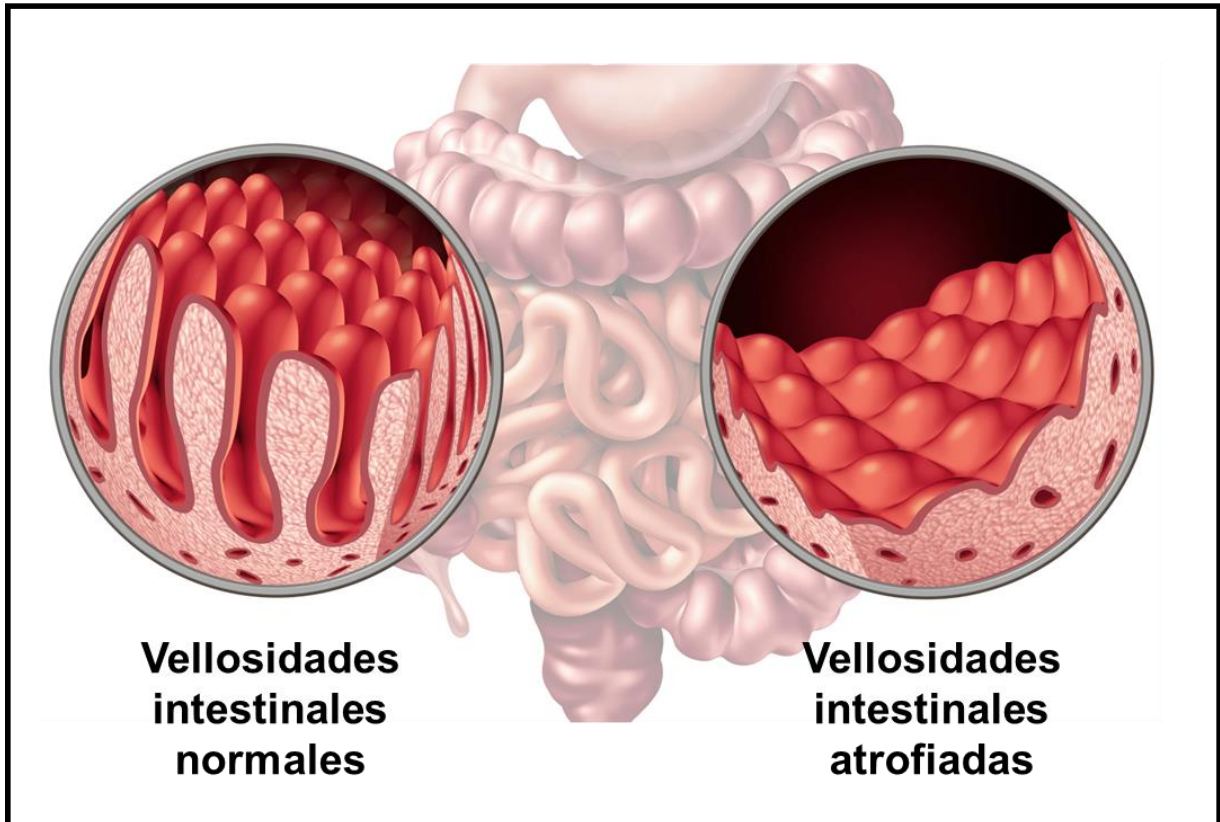


Figura 2. Atrofia de las vellosidades intestinales por la enfermedad celíaca. (Panisello 2004).

mejorar realizando una dieta exenta de gluten, y la enfermedad puede aparecer nuevamente al reintroducir el gluten (García Almeida y col 2012).

2. Síntomas y tratamiento

Dentro de los principales síntomas presentados por sujetos con enfermedad celíaca se encuentran los relacionados con problemas intestinales, tales como diarrea y malabsorción de nutrientes, generando pérdida de peso y déficit nutricional (Calle y col 2020).

En la actualidad el único tratamiento eficaz para disminuir o erradicar los efectos de esta enfermedad es seguir una alimentación sin gluten. Al seguir el tratamiento, puede conseguirse mejorar, reduciéndose la sintomatología en alrededor de 15 días, y recuperar las vellosidades del intestino en aproximadamente 2 años de iniciar con el tratamiento. El tratamiento consiste en la exclusión, de por vida, de cuatro cereales (trigo, avena, cebada y centeno), sus derivados y productos que los contengan (Labrada y col 2020).

3. Gluten

Es una glucoproteína, siendo una mezcla de varias proteínas, principalmente gliadina y glutenina. Las diferentes variedades de trigo se diferencian en el contenido de proteína y en la composición y distribución de las proteínas del gluten, representando estas aproximadamente un 80% (Biesiekierski 2017).

La gliadina en el trigo, consiste en proteínas con estructura de prolamina, rica en glutamina (responsable de las propiedades mecánicas del gluten) y en prolina, con varios enlaces intramoleculares, con masa molar entre 42,000 y 47,000 daltons. Es soluble en etanol al 70%, insoluble en agua y es de resaltar que, algunas de sus

fracciones, pueden presentar efectos tóxicos y agudizar los efectos sobre la enfermedad celíaca. La glutenina consiste en proteínas con estructura de glutelina, en forma monomérica, presenta masa molar que varía entre 20, 000 y 120,000 daltons.

Al unirse mediante enlaces disulfuros producen polímeros de altísimo peso molecular. Estas proteínas son ricas en los aminoácidos glutamina y prolina. Es insoluble en agua, etanol al 70% y soluciones neutras y se solubiliza en ácidos y bases diluidas (Badui 1997).

C. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DE PASTAS ALIMENTICIAS.

Como se ha mencionado, las pastas alimenticias tradicionalmente son elaboradas con sémola de trigo durum. Sin embargo, se pueden usar mezclas de este cereal con otros cereales o leguminosas (chícharo, frijol, garbanzo), o aún con otros cereales como el arroz.

1. Arroz (*Oryza sativa* L.)

a. Generalidades del arroz

Diversos autores han reportado que el cultivo de arroz se inició hace aproximadamente diez mil años, en regiones de Asia. Igualmente, señalan que el país donde fue cultivado inicialmente fue probablemente India, ya que en este país abunda el arroz silvestre. Sin embargo, el desarrollo de este cultivo se originó en China, de tierras bajas a tierras altas. Probablemente hubo varias rutas por las cuales se introdujeron los arroces de Asia a otras partes del mundo (Franquet-Bernis y Borrás-Pámies 2004).

Este cereal pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae), tribu Oryzae, subtribu oryzineas, género *Oryza*. Este es el fruto de la planta *Oryza sativa*, de color blanquecino, de forma alargada, y dispuesto en una panícula formada por varias espiguillas que crece en el ápice del tallo (Degiovanni y col 2010). Industrialmente, se considera al arroz cáscara aquel comprendido por el conjunto de cariopse y glumelas (**Figura 3**) (Franquet-Bernis y Borrás-Pámies 2009).

b. Producción de arroz

Este grano se considera la base alimenticia de más del 65% de la población mundial, por su gran aporte de carbohidratos. Tradicionalmente, el arroz es consumido como arroz blanco, pero en la actualidad se ha ido incorporando en una amplia cantidad de productos esto por las cualidades que este cereal presenta y aporta a diferentes productos (Chafla-Cando 2022).

El arroz se ubica entre los principales cultivos y es uno de los más producidos a nivel mundial, junto con el maíz y el trigo. Su producción en el mundo en el año 2022 fue de 787.2 millones de toneladas, siendo China el máximo país productor aportando 212.8 millones de toneladas, representando aproximadamente el 26.9% de la producción a nivel mundial, seguido de India con 195.4 millones de toneladas, y Bangladesh con 56.9 millones de toneladas. México este mismo año tuvo una producción de 257 mil toneladas, ocupando el lugar número 66 en la producción. (FAOSTAT 2023), siendo Nayarit el principal estado productor (SIAP 2023).

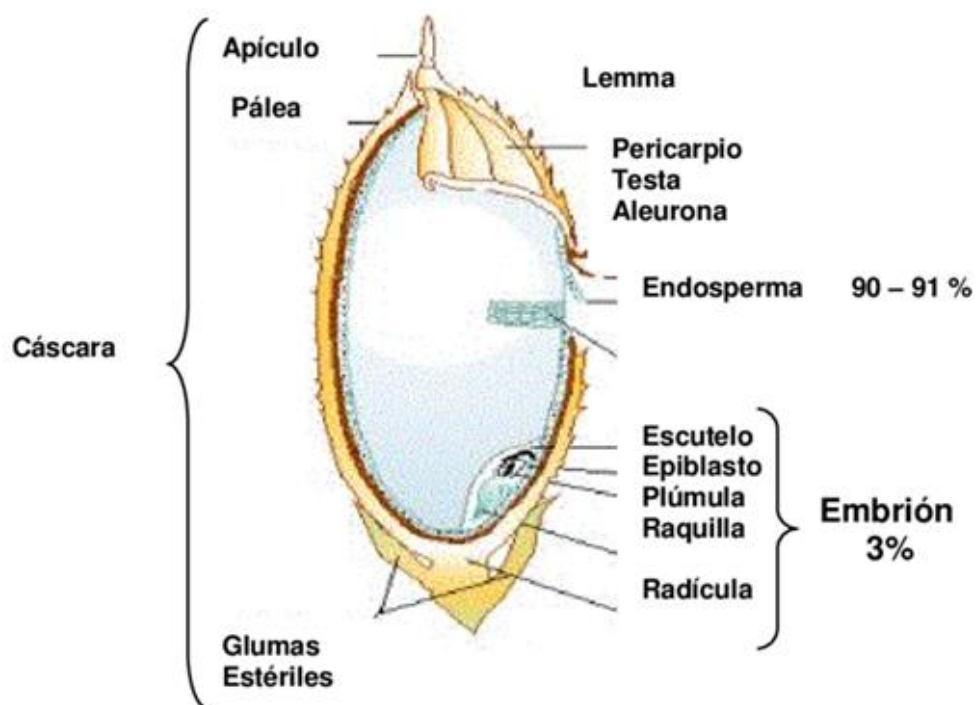


Figura 3. Partes constitutivas del grano de arroz. (Franquet-Bernis y Borrás-Pámies 2009).

c. Composición química del arroz

Su composición, propiedades y fracciones están influidas por el genotipo, medio ambiente y procesamiento del grano. El grano de arroz está compuesto por tres componentes básicos: almidón, proteínas y lípidos que constituyen el 98.5% de la materia seca; el porcentaje de estos nutrientes varía de acuerdo con el grado de procesamiento del arroz (Ortiz-Aragón 2018)

El almidón es el principal constituyente del arroz elaborado y se encuentra en forma de gránulos compuestos, es decir, muchos gránulos se despliegan simultáneamente dentro del mismo amiloplasto. Los gránulos compuestos están dentro de las células del endospermo, estando constituidos de 20 a 60 gránulos individuales. El gránulo de almidón de arroz individualmente es uno de los más pequeños dentro de los cereales, su tamaño varía de 3 a 5 μm y se forma de manera poligonal (Loubes 2015).

De acuerdo con Juliano (1994), el arroz Palay o con cáscara muestra mayores valores de fibra y cenizas que el arroz integral y el blanco o pulido, lo cual puede atribuirse directamente al alto contenido de minerales y de fibra no digerible en la cáscara. En el **Cuadro 2**, se detalla la variación en la composición proximal dependiendo del procesamiento del grano.

El arroz elaborado o pulido, constituido por el endospermo al cual se le ha eliminado el pericarpio, tegumento, testa, aleurona y embrión, presenta una disminución en los contenidos de proteína, grasa, fibra dietética, así como de cenizas y vitaminas como la tiamina, riboflavina, niacina y α -tocoferol. Los carbohidratos disponibles, sobre todo el almidón, abundan más en el arroz elaborado o pulido que en el arroz integral y el palay (Juliano 1994).

Cuadro 2. Composición proximal del arroz con cáscara (palay), integral y pulido.

Componente	Arroz palay	Arroz integral	Arroz pulido
	%	%	%
Proteína	5.8 – 7.7	7.1 – 8.3	6.3 -7.1
Lípidos	1.5 – 2.3	1.6 – 2.8	0.3 – 0.5
Fibra cruda	7.2 – 10.4	0.6-1.0	0.2 – 0.5
Cenizas	2.9 – 5.2	1.0 – 1.5	0.3 – 0.8
Carbohidratos	63.6 – 73.2	72.9 – 75.9	76.7 – 78.4
Almidón	53.4	66.4	77.6
Energía (kJ)	15.8	15.2 – 16.1	14.6 – 15.6

Fuente: (Juliano 1994).

Las proteínas del arroz son consideradas hipoalergénicas, por esta razón el arroz es considerado un cereal apto para consumirse en personas con la enfermedad celíaca. Dentro del grupo de cereales, solamente el arroz presenta como principal proteína de almacenamiento a la glutelina, siendo la prolamina mayormente en el restante grupo de cereales. Si bien en los cereales, la lisina es un aminoácido limitante; el arroz contiene cantidades considerables de este aminoácido esencial (Loubes 2015). Es de resaltar que la proteína del endospermo de arroz se compone de varias fracciones comprendidas en un 15% albúmina (hidrosoluble) más globulina (soluble en soluciones salinas), de un 5 a 8% de prolamina (soluble en alcohol) y el resto aproximadamente de 80 a 85% en glutelina (soluble en álcali) (Juliano 1994).

2. Garbanzo (*Cicer arietinum* L.)

a. Generalidades del garbanzo

El garbanzo es consumido mayormente como grano y su forma de preparación es diferente en las diferentes culturas. En algunos países de Asia y África, esta leguminosa es utilizada para preparar guisos, sopas, ensaladas y además se consume asado, cocido, salado y fermentado. Estas variantes y/o formas de consumirse ofrecen a las personas una importante nutrición y beneficios potenciales para la salud (Jukanti y col 2012). En México, se consume en fresco, frito con chile como aperitivo, o secado al sol, así como también es utilizado para alimentos tradicionales como sopas, cremas, harinas para la preparación de atole y mondongo (Utrilla-Coello y col 2007).

El garbanzo (*Cicer arietinum* L.) pertenece a la familia Leguminosae. Es una planta anual, tiene raíces profundas, tallos pelosos y ramificados, que alcanzan una altura de hasta 0.60 m. Sus frutos nacen en vaina bivalva con una o dos semillas en su interior, ligeramente arrugadas, con dos grandes cotiledones (Frimpong y col 2010).

Los 2 tipos de garbanzo existentes son Kabuli y Desi, siendo sus formas diferentes. El garbanzo Kabuli presenta vainas relativamente alargadas, tiene semillas grandes, con menor arrugamiento, presentando una coloración blanquecina o crema. Asimismo, el garbanzo Desi tiene semillas pequeñas con coloración marrón, conteniendo una capa áspera y una superficie con grandes estrías. La cubierta de la semilla del tipo Desi es ampliamente más gruesa que la de los tipos Kabuli, pero en ambos tipos hay buena adherencia del recubrimiento de la semilla y de los cotiledones (Jukanti y col 2012).

b. Producción de garbanzo

El garbanzo se produce en más de 50 países, de los cuales 89.7% se localizan en Asia, 4.3% en África, 2.6% en Oceanía, 2.9% en América y 0.4% en Europa. La producción de garbanzo a nivel mundial reportada en el año 2022 fue de 15.8 millones de toneladas. Donde la India se posicionó como el principal productor aportando 11.9 millones de toneladas, representando alrededor del 75.3% de la producción mundial, seguido de Australia con 876.4 mil toneladas, y Etiopía con 478.2 mil toneladas; México, ese mismo año, tuvo una producción de 226 mil toneladas representando el 1.43% de la producción mundial (FAOSTAT 2023), y el principal estado productor de esta leguminosa fue Sinaloa con 128.8 mil toneladas, representando el 56.9% de la producción nacional, seguido por Jalisco con 24.6 mil toneladas y Michoacán con 21.2 mil toneladas (SIAP 2023).

c. Composición química del garbanzo

El garbanzo se considera una leguminosa de alta importancia en el mundo principalmente por su alto valor nutritivo, por ser rico en proteínas, carbohidratos,

minerales, almidón y lípidos; sobre todo en los ácidos grasos insaturados oleico y linoleico (López-Padrón y col 2021).

Las características nutricionales del garbanzo lo sitúan como un alimento de buena calidad, considerando que su contenido de proteína se encuentra en un intervalo de 14.9 a 25.6% (**Cuadro 3**). Asimismo, la concentración de aminoácidos esenciales excepto los azufrados y el triptófano se encuentran presentes en cantidades superiores a las recomendadas en el patrón FAO/WHO/UNU (1985) para la dieta de un infante de 2 a 5 años (Iqbal y col 2006).

Existen reportes que el garbanzo crudo presenta una relación de eficiencia proteínica (PER) de 2.2 y es aumentada a 2.5 cuando es procesado térmicamente, presentando valores de digestibilidad proteínica de 76-78%. Con relación a la concentración de carbohidratos, el garbanzo se encuentra en el intervalo de 38 a 60%, de los cuales el 47% es almidón y de este aproximadamente el 3.39% es almidón resistente (De Almeida y col 2006) y el resto corresponde a dextrinas y oligosacáridos, entre los cuales destacan la estaquiosa y rafinosa, que se encuentran en un 1.1 y 1.9% respectivamente (Hulse 1991).

De acuerdo con Apáez y col (2020), esta leguminosa, en adición a presentar niveles elevados de proteínas y carbohidratos, contiene importante contenido de minerales tales como Ca, Mg, Zn, K, Fe y P, y vitaminas como tiamina y niacina. En comparación con algunas otras leguminosas presenta mayor fuente de fibra al igual que lípidos.

Cuadro 3. Composición proximal del garbanzo.

Componentes	Contenido (%)
Humedad	9.5-11.2
Proteínas	14.9-25.6
Lípidos	4.2-6.2
Fibra dietaria	17.4-20.1
Cenizas	1.8-2.7
Carbohidratos	38-60

Fuente: (De Almeida y col 2006; Iqbal y col 2006)

D.MÉTODOS DE ELABORACIÓN DE PASTAS ALIMENTICIAS

Existen diferentes métodos para el proceso de elaboración de pastas dentro de los cuales se pueden destacar el método de laminación y el proceso de extrusión (**Figura 4**).

1. Laminación

La laminación, también denominada “hojueado” o “estiramiento”, (Hou y col 2010), consiste en preparar una masa con un contenido de humedad del 30-40% en una premezcladora y luego enrollarla entre pares de rodillos consecutivos, con diferentes diámetros de rodillo, para obtener como resultado láminas de masa más delgadas hasta el grosor deseado. A continuación, las láminas de masa se cortan en formas adecuadas y se secan de la misma manera que la pasta prensada. En la tecnología de laminado no es utilizado vacío, como es el caso de la producción de pasta extrudida, que, junto con el método tradicional, es uno de los procesos más utilizados en la elaboración de pastas (Zardetto y Dalla-Rosa 2006).

2. Extrusión

El procesamiento de alimentos a alta temperatura sigue siendo un desafío en las industrias de procesamiento de alimentos, ya que puede conducir al deterioro de los valores nutritivos en los alimentos debido a las altas temperaturas. Para evitar esto, se ha empleado la cocción por extrusión, ya que tiene una alta productividad, una retención significativa de nutrientes y un tiempo de procesamiento mínimo en comparación con la cocción convencional. La cocción por extrusión es un proceso de corta duración a alta temperatura (HTST) que inactiva las enzimas y reduce la contaminación microbiana en los alimentos (Bordoloi y Ganguly 2014).



Figura 4. Métodos de elaboración de pastas: **A.** Método de laminación; **B.** Método de extrusión. (Hou y col 2010; Bordoloi y Ganguly 2014).

La tecnología de extrusión, consiste en un proceso complejo que ha sido diseñado para crear una gran cantidad de productos alimenticios que incluyen pastas alimenticias, cereales para desayuno, alimentos para bebe, botanas, artículos de confitería, chicle, proteínas vegetales texturizadas, almidón modificado, alimentos para mascotas, sopas deshidratadas, mezclas de bebidas secas, etc. (Kaur y col 2014).

La extrusión de alimentos implica el proceso de forzar los materiales alimenticios a fluir bajo una variedad de operaciones, incluyendo amasado, fusión y/o cizallamiento, a través de un orificio (matriz) que está diseñado específicamente para dar forma y/o expandir el material (Steel y col 2012). La ventaja del proceso de extrusión es la capacidad de generar una gran variedad de alimentos a base de materiales económicos, utilizando bajos tiempos de procesamiento, a través de un sistema eficiente y continuo. Además de realizar varias operaciones unitarias al mismo tiempo, incluyendo mezcla u homogeneización y cizallamiento, cocción térmica, entre otras (Akhtar y col 2015).

El proceso de extrusión produce diferentes efectos en los alimentos debido a los niveles variables de almidón, proteínas, humedad y otros componentes que influyen en la estructura y textura de los productos resultantes (Fellows 2012). La exposición a los efectos combinados de alta presión, alta temperatura y cizallamiento conduce a varias reacciones y modificaciones en la composición nutricional de los materiales alimenticios con cambios resultantes en las propiedades funcionales (Brennan y Grandison 2012). Los cambios que ocurren durante el proceso pueden ser simples o complejos, y abarcan gelatinización, solubilización y/o formación compleja de almidones, desnaturalización de proteínas, desnaturalización de vitaminas e inactivación de factores antinutricionales (Riaz 2010; Steel y col 2012). La cantidad de

cizallamiento aplicado también es significativa: el cizallamiento alto altera las moléculas de proteína y almidón, afectando su funcionalidad, como la solubilidad, la viscosidad y la capacidad de retención de agua (Karwe 2009).

La tecnología de extrusión es una de las más utilizadas para producir pasta. Se utilizan altas temperaturas, presiones y fuerzas de cizallamiento controladas. Las condiciones de extrusión, como la temperatura y la velocidad del tornillo, influyen en la calidad final de las pastas alimenticias. Diversos autores han estudiado el efecto de las condiciones de procesamiento sobre las pastas, tal es el caso de Barbiroli y col (2013), quienes elaboraron una pasta a base de arroz con las siguientes condiciones de procesamiento; temperaturas de extrusión (TE) de 120 °C y contenido de humedad (CH) del 40 %, obteniendo resultados de pérdidas de sólidos por cocción del 5.6 al 12.6 % y una absorción de agua de $77.3 \pm 3.5 - 90.7 \pm 4.2$ g/ 100 g,

Rafiq y col (2015) elaboraron pastas alimenticias a base de arroz integral variando la TE de 70-110 °C, el CH de 28-34 % y la velocidad de tornillo (VT) de 120-220 rpm, obteniendo valores para tiempo de cocción (TC) de 8-15 min, capacidad de absorción de agua (CAA) de 218-308.1 %, capacidad de hinchazón de 1.30-2.20 ml/g y pérdidas de sólidos por cocción (PSPC) de 4.01-22.60 %.

Laishram y Das (2017) produjeron pastas alimenticias a base de arroz integral y harina de maíz (13.2-46-8 %) con las siguientes condiciones de procesamiento; TE de 35 °C, CH de 35 % y VT de 100 rpm, obteniendo resultados de índice de absorción de agua (IAA) de 0.77-2.64 g/g, índice de solubilidad en agua (ISA) de 20.79-53-92 %, TC de 5.30-18.1 min, CAA de 240-305 % y PSPC de 3.19-9.55 %.

Wang y col (2017) elaboraron pastas alimenticias a base de arroz y salvado de arroz (5-25 %) variando la TE de 50-100 °C, CH de 30 % y VT de 100 rpm, obteniendo valores de IAA de 6.4-7.4 g/g, CAA de 203.13-224.67 % y PSPC de 4.95-17.33 %.

El-Biale y col (2017) obtuvieron pastas alimenticias a base de maíz, almidón de maíz y aceite de maíz, a TE de 40-115 °C, CH de 34 % y VT de 10-50 rpm, obteniendo como resultado TC de 2-20 min, CAA de 165-212 % y PSPC de 12.4-22-7 %.

Bouasla y Wojtowicz (2019) elaboraron pastas alimenticias a base de arroz y trigo sarraceno (50:50), variando las condiciones de procesamiento TE de 80-120 °C, CH de 30-36 % y VT de 60-100 rpm, obteniendo como resultado valores de TC de 8.5 min, CAA de 237.77 %, PSPC 5.23 %, e IE de 1.21.

IV. JUSTIFICACIÓN

Debido al creciente incremento de personas con la enfermedad celíaca y a la preferencia de los consumidores por alimentos libres de gluten, se busca el desarrollo de nuevos productos como lo son las pastas alimenticias, que son ampliamente consumidas debido a que son de fácil preparación y bajo costo, buscándose el desarrollo de estas con materias primas alternativas. Entre las materias primas que pueden utilizarse para su producción destaca el arroz quebrado, que es un subproducto de la molienda del arroz, siendo un cereal considerado inocuo para personas con celiacía. Asimismo, la adición de garbanzo podría mejorar el contenido de proteínas de estos alimentos que son mayormente producidos utilizando como materia prima a la sémola de trigo. Además, permitiría mejorar la calidad proteica y sus propiedades fitoquímicas/funcionales de las pastas, ya que se obtendrían proteínas de buena calidad biológica al combinarse con las proteínas del arroz. Asimismo, el garbanzo aporta importante contenido de compuestos bioactivos y fibra dietaria con potenciales efectos benéficos en la salud del consumidor. Existe información reportada en la literatura que procesos como el de extrusión pueden modificar la composición microestructural del almidón aportado por cereales, mejorando las propiedades físicas y fisicoquímicas de las pastas. Actualmente no se ha encontrado información científica reportada en la literatura sobre elaboración y caracterización de pastas alimenticias extrudidas libres de gluten combinando harinas de arroz quebrado y garbanzo extrudido, por lo cual con el presente estudio se estaría generando información científica inédita, dándole valor agregado a esta leguminosa que es ampliamente producida en el estado de Sinaloa.

V. HIPÓTESIS

Las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas a partir de arroz quebrado y garbanzo extrudido presentan propiedades físicas, fisicoquímicas, fitoquímicas y sensoriales similares o mejores a pastas comerciales.

VI. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Estudiar las propiedades físicas, fisicoquímicas, fitoquímicas y microestructurales de pastas alimenticias extrudidas libres de gluten elaboradas a partir de arroz (*Oryza sativa* L.) adicionadas con harinas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.)

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización química, fisicoquímica, fitoquímica y microestructural de las materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas alimenticias libre de gluten.
2. Estudiar el efecto de la temperatura de extrusión (TE), velocidad de tornillo (VT) y contenido de harina de garbanzo (CHG) sobre las propiedades físicas (índice de expansión (IE), parámetros de color (L, b* y ΔE)) y fisicoquímicas (índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) de las pastas alimenticias obtenidas.
3. Evaluar el efecto de los factores de estudio sobre los parámetros de cocción (tiempo óptimo de cocción (TC), aumento de volumen (AV), aumento de peso (AP) y pérdidas de sólidos por cocción (PSPC)) en las pastas obtenidas.
4. Estudiar el efecto de los factores de estudio sobre las propiedades fitoquímicas, funcionales y biológicas (carotenoides totales (CT), compuestos fenólicos totales (CFT), actividad antioxidante ABTS (ABTS), actividad antioxidante DPPH (DPPH), inhibición de oxidación por el radical hidroxilo (Deoxi), e inhibición de la oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL)) en las pastas obtenidas.

5. Llevar a cabo la optimización del proceso de extrusión para obtener las mejores condiciones de procesamiento y su validación comparando los valores predichos por los modelos con los valores reales.
6. Realizar una caracterización microestructural (microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos x, y cristalinidad relativa) de las pastas libres de gluten obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento.
7. Efectuar una caracterización nutrimental (digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV), perfil de aminoácidos esenciales (AAE), perfil de minerales, contenido de gliadinas, índice glicémico, y fibra dietaria) de las pastas alimenticias libres de gluten obtenidas en las condiciones óptimas.
8. Realizar un estudio sensorial con jueces no entrenados en las pastas alimenticias libres de gluten obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento, pasta control y pasta comercial.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

A. MATERIALES

1. Materias primas

Se utilizaron como materias primas para la elaboración de las pastas alimenticias libres de gluten, arroz quebrado (Grupo ÁNSERA S.A. de C.V., Culiacán, Sinaloa) y harina de garbanzo extrudido (Macfrut S.P.R. de R.I., Culiacán, Sinaloa). El arroz quebrado fue molido hasta obtener un tamaño de partícula $<420 \mu\text{m}$. Las materias primas se almacenaron a bajas temperaturas ($\sim 6\text{-}8^\circ\text{C}$), y fueron protegidas de la luz en bolsas negras hasta que fueron procesadas.

B. MÉTODOS

1. Proceso de extrusión

Se realizó utilizando un extrusor de doble tornillo (marca Shandong light, modelo LT32L), que presentaba un dado de salida con 2 aberturas circulares, con medidas internas de 2 mm de diámetro, y tornillos con una relación de compresión 2:1. La concentración de harina de garbanzo extrudido (HG) fue variada de acuerdo al diseño experimental de 0.23 a 23.77%. Durante todos los tratamientos, las temperaturas fueron mantenidas fijas en la sección de alimentación y salida en 75 y 80 °C, respectivamente, siendo la temperatura en la zona de mezclado/cocción (TE) variada de 90.18 a 123.82 °C, y la velocidad de tornillo (VT) variada en un rango de 76.64 a 157.38 rpm, de acuerdo al diseño experimental. Las muestras de harina utilizadas durante el proceso de extrusión, en cada tratamiento, fueron de alrededor de 1500 g siendo ajustadas a un contenido de humedad de $28 \pm 1\%$, utilizando una batidora de

laboratorio (KitchenAid, modelo K5SS, Michigan, EUA) a mínima velocidad, y alimentadas al extrusor, utilizando un alimentador cónico con tornillo alimentador de velocidad variable. La **Figura 5** muestra el aspecto visual de las diferentes etapas del procesamiento para la obtención de pastas alimenticias libres de gluten, así como los materiales obtenidos en las diferentes etapas (sin procesar, pasta seca, pasta cocida).

2. Métodos analíticos

a. Caracterización de materias primas

1) Composición proximal

Se realizó este análisis proximal en las harinas de arroz quebrado (HAQ) y harinas de garbanzo extrudido (HG)) que se utilizaron para la elaboración de los diferentes tratamientos, previamente se molieron estas materias primas y se tamizaron en una malla 40, para la obtención de materiales con tamaño de partícula menor a 420 μm . Estas determinaciones fueron realizadas utilizando las metodologías reportadas por la AOAC (2012). Se utilizaron, para proteínas la metodología (960.52), grasas (920.39), cenizas (923.03), humedad (925.10), fibra cruda (962.09), siendo el contenido de carbohidratos determinado por diferencia de los demás componentes

2) Tamaño de partícula

Fue realizada esta determinación en las harinas de arroz quebrado y harinas de garbanzo extrudidas utilizadas para la producción de pastas alimenticias a partir de extrusión, utilizando la metodología reportada por Ortiz-Robles (1998). Fueron utilizados 100 g de muestra y tamices con mallas (20, 40, 60, 80, 100, y 200), marca Fisherbrand.

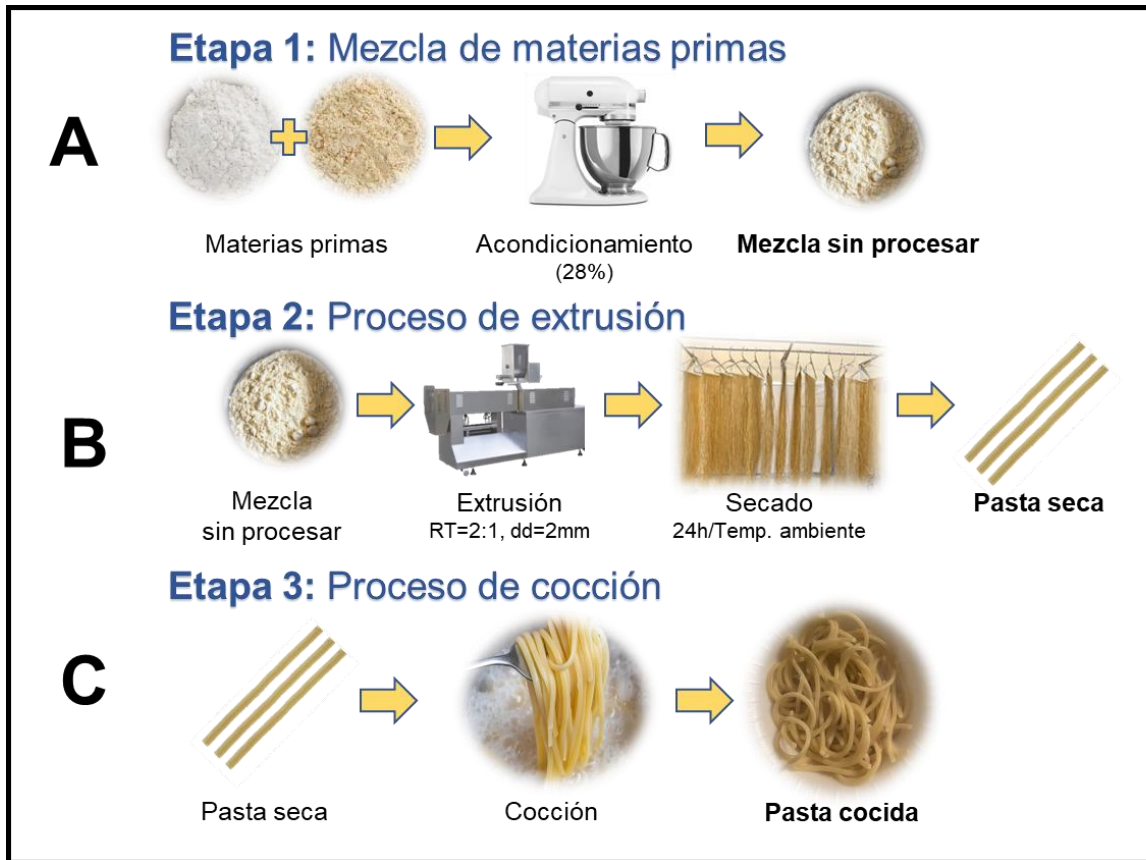


Figura 5. Etapas de procesamiento para la obtención de pastas alimenticias libres de gluten a partir de arroz quebrado y garbanzo extrudido y materiales obtenidos en las diferentes etapas (A) mezcla, (B) extrusión, (C) cocción.

Fue determinada la cantidad de harina retenida en cada malla (P_n) y su % correspondiente. Los resultados fueron reportados calculando el tamaño medio de partícula reportado mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$T_{mp} = \frac{\sum_{n=20}^{200} n P_n}{\sum_{n=20}^{200} P_n}$$

En la ecuación:

T_{mp} = Tamaño medio de partícula.

P_n = Peso de la harina retenida en mallas.

n = Número de malla.

3. Métodos fisicoquímicos

a. Índice de expansión (IE)

El índice de expansión de las pastas alimenticias se determinó dividiendo el diámetro promedio de la pasta entre el diámetro interior del dado de salida del extrusor, para lo cual se utilizó un Vernier digital (Steren, modelo HER-411) (Baladrán-Quintana y col 1998). Fueron realizadas 15 determinaciones en cada tratamiento.

b. Densidad aparente (DA)

Se calculó la densidad aparente (DA) de acuerdo al procedimiento descrito por (Wang y col 1993). Se tomó una muestra de alrededor de 5 cm de longitud en cada tratamiento, se anotó su peso (p_m), fue medido su diámetro (3 mediciones equidistantes, reportando valor medio) (d), y su longitud (l). Se reportaron los valores de DA en kg/m^3 , llevándose a cabo 15 mediciones por tratamiento, realizándose los cálculos mediante la siguiente ecuación:

$$DA = pm / [(\pi) (d/2)^2 (l)]$$

Donde los parámetros de la fórmula de densidad aparente son:

pm= peso de la muestra

(l)= longitud

(d)= diámetro

c. Índice de absorción de agua (IAA)

Se realizó de acuerdo a la metodología 54-21 descrita por la AACC (2010), con algunas modificaciones. Una muestra de 1 g de harina de las materias primas y de las pastas alimenticias libres de gluten fue suspendida en 12 mL de agua a 25 °C en un tubo tarado para centrífuga de 15 mL, el cual se agitó a una velocidad moderada en un homogenizador (Vari-Mix Aliquot Mixer, Modelo M48725) por 30 min. Posteriormente, la suspensión fue centrifugada en un equipo (Eppendorf, 5804R) a 3200 x g por 30 min, a una temperatura de 25 °C. Fue decantado el líquido sobrenadante en un recipiente para determinar sólidos. El gel se pesó y el IAA fue calculado reportándose en g de agua absorbida/g de sólidos secos. Se realizaron 3 repeticiones por tratamiento.

d. Índice de solubilidad en agua (ISA)

Se determinó utilizando los sólidos secos que se recuperaron del sobrenadante que se obtuvo de la medición de IAA que fue evaporado. Fue expresado como el % de sólidos secos que se recuperaron por g de muestra. La evaluación se realizó por triplicado (AACC 2010).

e. Parámetros de color

Los parámetros de color se determinaron en las materias primas, en las mezclas sin procesar, y en las muestras procesadas, utilizando un colorímetro triestímulo marca Minolta. Se tomaron las muestras, se molieron y se cribaron utilizando una malla 60 (250 μm). Fueron colocados los materiales en cajas Petri con 5 cm de diámetro, llevándose a cabo cinco determinaciones, cuatro equidistantes y otra en el centro, reportándose el valor medio. Se reportaron los valores L^* (luminosidad), a^* (de verde a rojo), y b^* (de azul a amarillo). Asimismo, fueron calculados los parámetros ΔL^* , Δa^* y Δb^* , que indican la diferencia de color entre cada tratamiento sin extrusión comparado con el mismo tratamiento extrudido (pastas alimenticias), obteniéndose la diferencia total de color (ΔE) utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

4. Propiedades de cocción

a. Tiempo de cocción (TC)

Se obtiene cuando desaparece la zona blanquecina que corresponde al almidón que todavía no gelatiniza, es el tiempo que se requiere para la obtención de una pasta “*al dente*”. Para obtener este tiempo, 25 g de producto (trozos de 5 cm) fueron sumergidos en 300 mL de agua destilada a temperatura de ebullición, transcurridos 30 s, una cinta de pasta fue sacada del recipiente con agua a temperatura de punto de ebullición (~ 98 °C), siendo colocada en un recipiente con agua a temperatura ambiente para detener el cocimiento de la pasta. Una vez enfriada la cinta, esta fue colocada en una hoja de papel de color y con ayuda de una lámina de vidrio fue presionada suavemente, para observar el punto blanco, esta operación fue repetida

cada 30 s hasta obtener el punto “*al dente*”. Se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento.

b. Aumento de peso (AP)

En cada tratamiento fueron utilizados 25 g de muestra, siendo las pastas cortadas en fracciones de 5 cm de largo, y cocinadas hasta su tiempo de cocción utilizando 300 mL de agua destilada (~ 98 °C). Fue escurrida el agua y se sumergieron las pastas en 50 mL de agua a temperatura ambiente (~ 25 °C) durante 1 minuto, posteriormente, se escurrieron hasta alcanzar la temperatura ambiente y fueron pesadas. El AP fue reportado en %; se obtuvo la diferencia de peso entre la pasta seca y pasta cocida, y fue dividido el resultado entre el peso inicial de la pasta. Fueron realizadas 3 determinaciones en cada tratamiento.

c. Aumento de volumen (AV)

El aumento de volumen de las pastas se determinó utilizando 50 mL del solvente hexano en una probeta de 100 mL. La relación entre el volumen del solvente desplazado por la pasta cocida (10 g) sirvió de parámetro para la determinación del aumento de volumen, realizándose tres repeticiones por tratamiento.

d. Pérdidas de sólidos por cocción (PSC)

Esta determinación fue realizada con el agua de cocción que se obtuvo de la prueba de “aumento de peso”, que fue recolectada en recipientes de vidrio a peso constante, siendo evaporada a 105 °C, durante 24 horas. El residuo de evaporación se pesó, siendo reportado como % de PSC en relación al material original.

Todos los análisis de las pruebas de cocción reportadas anteriormente se realizaron siguiendo la metodología propuesta por la AACC 16-50 (1990).

5. Métodos fitoquímicos y funcionales

a. Carotenoides totales (CT)

1) Extracción

Se realizó utilizando el método reportado por Kimura y Rodríguez-Amaya (2004). Fue pesado un gramo de muestra, que se rehidrató con 5 mL de agua desionizada, para dejarse en reposo por treinta minutos en un agitador Vari-Mix.

Posteriormente, se agregaron diez mL de acetona fría, y la mezcla fue homogenizada por un tiempo de 15 minutos en el equipo Vari-Mix. Al terminar la homogenización se filtró con papel Whatman # 40 y bomba con vacío. Posteriormente, se recolectó el extracto, y se realizó de nuevo otra extracción utilizando 5 mL de acetona fría (-20 °C). Dicho procedimiento se repitió hasta que desapareció el color del residuo. Subsecuentemente, se utilizó una tercera parte del volumen recuperado en la extracción, y se agregaron 7 mL de éter de petróleo, y 20 mL de agua destilada, sin agitar la mezcla para no formar emulsión. La mezcla se dejó en reposo durante 15 min para separar las fases, retirando la fase acuosa, y recuperando el éter de petróleo. Este proceso fue realizado por duplicado recuperando en cada etapa una tercera parte del volumen del extracto filtrado, leyéndose la absorbancia del extracto a una absorbancia de 450 nm.

2) Determinación de carotenoides totales

Se determinó el contenido de carotenoides totales mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Carotenoides totales } (\mu\text{g/g}) = \frac{(A \text{ total} * \text{Volumen total en mL} * 10^4)}{\left(\frac{A1\%}{1\text{cm}} * \text{peso de la muestra en gramos}\right)}$$

Donde:

A total = Absorbancia obtenida

A1% / 1 cm = Coeficiente de absorción de carotenoides en éter de petróleo en una celda de 1 cm (2500).

Los resultados fueron reportados en μg de carotenoides totales / gramo de muestra.

b. Extracción de fitoquímicos

1) Extracto de fitoquímicos libres

Se obtuvo el extracto siguiendo la metodología reportada por Adom y Liu (2002) y Moore y col (2005), utilizando material desgrasado. Fueron mezclados un gramo de muestra y diez mL de etanol al 80 % (v/v). Fueron agitados por 10 minutos y centrifugados a $3,000 \times g / 10^\circ\text{C} / 10 \text{ min}$, realizándose este procedimiento 4 veces. Fue concentrado el sobrenadante utilizando una presión baja en un rotavapor (marca Heidolph, modelo laborota 4011-digital) a una temperatura de 40°C , hasta sequedad, y este fue recuperado utilizando 2 mL de metanol. Fueron almacenados los extractos a una temperatura de $5-7^\circ\text{C}$, para después utilizarse en las pruebas de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de fitoquímicos libres. El precipitado fue almacenado para obtener los extractos ligados.

2) Extracto de fitoquímicos ligados

En esta extracción se utilizó el precipitado que se obtuvo al extraer los fitoquímicos libres, el cual fue digerido utilizando diez mL de NaOH 0.5 M, llevándose a baño María a $60^\circ\text{C} / 30 \text{ min}$. Subsecuentemente, fue llevado a una temperatura de 25°C , y fueron añadidos dos mL de HCl concentrado. Fueron agitados los tubos por diez minutos y

se adicionaron diez mL de acetato de etilo, realizando una agitación de nuevo por diez minutos. Fue llevada a cabo una centrifugación a 3,000xg/10 °C/10 min, fue recuperado el sobrenadante, y se adicionó acetato de etilo de nuevo (3 veces). El acetato de etilo fue evaporado en el rotavapor hasta sequedad, y después fue recuperado el extracto utilizando dos mL de metanol. Fueron almacenados los extractos a una temperatura de 5-7 °C para utilizarse en las pruebas de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de fitoquímicos ligados.

c. Compuestos fenólicos

1) Curva de calibración

Para realizar la curva fue preparada una solución en donde fueron pesados 0.01 g de ácido gálico monohidratado, disolviéndose con diez mL de metanol. Fueron preparadas diluciones de 0.5, 10.5, 20.5, 30.5, 40.5 ppm utilizando el ensayo Folin-Ciocalteu explicado en la siguiente sección, llevándose a cabo la curva de calibración por triplicado.

2) Determinación del contenido de compuestos fenólicos libres, ligados y totales

Se determinó mediante una modificación del método de Folin-Ciocalteu (Singleton y col 1999); donde se tomaron 30 µL de extracto, 3 mL de agua destilada y 200 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu. Los materiales se colocaron en tubos de ensayo llevándose a cabo la reacción por un tiempo de diez minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, se añadieron 600 µL de una solución de carbonato de sodio al 20% y se incubó por veinte minutos a 40 °C en un baño de temperatura controlada (Marca Heidolph modelo LABOROTA 4011). Posteriormente, fue realizado un enfriamiento utilizando hielo, y fue medida la absorbancia a 765 nm en un espectrofotómetro (modelo GENESYS 10 UV, EUA). Se realizó la comparación de las absorbancias

obtenidas con la curva de calibración, siendo reportado el contenido de compuestos fenólicos en mg de equivalentes de ácido gálico/ g de muestra (mg EAG/ g b.s.).

d. Actividad antioxidante ABTS

1) Extracción

Se utilizó el extracto que fue empleado para determinar el contenido de compuestos fenólicos.

2) Medición de la actividad antioxidante

Fue utilizado el método reportado por Re y col (1999) realizando ligeras modificaciones. Se preparó el radical catión ABTS⁺ mezclando 5 mL de ABTS⁺ (7mM) y 88 μ L de K₂S₂O₈ (140 mM). Esta mezcla fue dejada en reposo a temperatura ambiente durante 16 horas en oscuridad para generar el radical. Una vez realizada la formación del radical, fue ajustada la absorbancia a 0.70, utilizando una longitud de onda de 734 nm para realizar el ensayo. Fueron pesados 0.01 g de trolox, los cuales fueron disueltos en 10 mL de metanol, obteniéndose una solución de 1000 ppm (1 mg/mL), para realizar la curva de calibración. Fueron utilizados 60 μ L de la solución de trolox y se le añadieron 1940 μ L del radical ABTS⁺ con absorbancia ajustada a 0.7. Asimismo, fue determinada la absorbancia (A₀) del control formado con 60 μ L de metanol y 1940 μ L de radical ABTS⁺. Subsecuentemente, los tubos fueron mezclados con vortex durante 10 s, llevándose a cabo una agitación orbital por 10 min. Posteriormente, se leyó la absorbancia (A) a 734 nm en las soluciones de trolox con el radical ABTS⁺. La capacidad antioxidante en equivalentes de trolox (CAET) fue calculada mediante regresión, empleando la ecuación en donde es relacionada la concentración de trolox con los valores de absorbancia. Los resultados fueron reportados en μ mol ET/g (base seca).

e. Actividad antioxidante DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil)

1) Extracción

Fue utilizado el extracto que se empleó para determinar el contenido de compuestos fenólicos.

2) Curva de calibración

Para determinar la AAO mediante el método DPPH, fue modificada la metodología reportada por Kim y col (2002). Fueron pesados 2.4-3 mg del radical DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil), aforándose a 100 mL utilizando metanol, siendo ajustada la absorbancia del radical (0.76-0.78) a una longitud de onda de 515 nm. Para realizar la curva de calibración fue relacionada la concentración de las diluciones y el porcentaje de inhibición. Fueron pesados 0.01 gramos de trolox y se aforaron a 10 mL de metanol (1000 ppm), formándose distintas diluciones de 25, 50, 100, 200, 400, 800 y 1000 ppm. Se realizó una gráfica en función de la concentración de las soluciones de trolox.

3) Medición de actividad antioxidante

Para su medición en las diferentes muestras fue determinada la absorbancia (A0) del control que presentaba 100 μ L de metanol y 2900 μ L de radical DPPH. Igualmente, fueron adicionados 100 μ L del extracto de muestra y 2900 μ L del radical DPPH. Se dejaron en reposo durante 30 minutos en la oscuridad, siendo leída la absorbancia a 515 nm. Se reportaron los valores de capacidad antioxidante en μ mol equivalentes de trolox / gramo de muestra seca (μ mol ET/g bs).

f. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo (Deoxi-D-Ribosa)

Este ensayo determina la capacidad de captación del radical hidroxilo (OH^\cdot). Este radical es generado mediante la reacción de Fenton utilizando peróxido de hidrógeno y una mezcla de ácido ascórbico, cloruro de hierro III y EDTA.

La metodología propuesta por Halliwell y col (1987) fue empleada para la realización de este ensayo. Fue pesado 1 mg del extracto de las muestras, así como del estándar catequina, disolviéndose con 1 mL de la solución buffer de fosfatos, formándose soluciones con una concentración de 1000 ppm (1 mg/1 mL), realizándose la curva de calibración a partir de la solución con catequina. Fueron colocados en tubos, 500 μL de dilución, 100 μL de deoxi-D-ribosa (28 mM), 200 μL de solución premezclada de cloruro férrico: ácido etilén-diamino-tetraacético (100 μL de EDTA 1000 μM , 100 μL de FeCl_3 1000 μM), 100 μL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) 10 mM y 100 μL de ácido ascórbico 1 mM. Dichos reactivos fueron agitados en vortex e incubados a 37 °C/1 h. Posteriormente, fue añadido 1 mL de ácido tricloroacético (TCA) 2.8 % y 1 mL de ácido tiobarbitúrico (TBA) 1 %, siendo posteriormente agitados y calentados en un baño de agua (95 °C/20 min). Después, fue detenida la reacción mediante enfriamiento de las muestras (3–5 °C) por 5 min. Se adicionaron 2 mL de n-butanol en los diferentes tubos, siendo agitados por 1 min en vortex, y centrifugados a 3000 $\text{xg}/10 \text{ min}/25 \text{ }^\circ\text{C}$. El espectrofotómetro fue ajustado con n-butanol, siendo utilizada como blanco (A0) una solución buffer de fosfatos sustituyendo las muestras. Al final, la fase orgánica (rosa) fue leída a 532 nm. Los resultados se reportaron como % de atrapamiento del radical OH^\cdot , el cual se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ atrapamiento de radical (OH)} = \frac{\text{Absorbancia blanco} - \text{Absorbancia muestra}}{\text{Absorbancia blanco}} * 100$$

Una disminución de la coloración rosa, respecto al control implica la captación del radical hidroxilo (Turpín-Saorín 2010).

6. Método de determinación del efecto biológico

a. Inhibición de la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL)

Este ensayo es considerado de tipo biológico, debido a que se emplea plasma humano para la obtención de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), en donde se induce su oxidación. En este método es determinada la capacidad para captar el radical peroxilo (ROO⁻). El radical es obtenido por la peroxidación de liposomas, al igual que en membranas orgánicas a 37°C en un sistema cloruro de hierro III-ácido ascórbico. De forma similar que en la prueba Deoxi-D-ribosa, al añadir ácido tiobarbitúrico es formado el cromógeno tiobarbitúrico malondialdehído (ABT2 MDA). Una disminución en la coloración rosa respecto al control implicará la captación del radical peroxilo (Turpín-Saorín 2010).

Para determinar el % de inhibición de oxidación de las LDL, se siguió como base la metodología propuesta por Loy y col (2002) con algunas modificaciones. Se obtuvieron las LDL colocando 10 mL de plasma sanguíneo humano y agregando (1 mL) del reactivo precipitante (marca Spinreact, Girona, España). Después, la mezcla fue centrifugada a 3000 xg/10 min/25°C, y en el pellet que se obtuvo de la centrifugación se encontraron las LDL a analizarse. Fueron realizadas diluciones con una concentración de 1000 ppm utilizando buffer de fosfatos (pH 7.4). Se colocaron 300 µL de LDL en tubos de cristal de 5 mL, posteriormente se agregó una alícuota de 100 µL de muestra, y 100 µL de sulfato cúprico (CuSO₄) a 50 mM. Posteriormente, cada tubo fue llevado a 1 mL utilizando buffer de fosfatos (pH 7.4). La mezcla fue agitada en vortex y fue incubada durante 3 h/37 °C. Después, fue agregado 1 mL de

ácido tricloroacético (TCA) al 15 %, y 1 mL de ácido tiobarbitúrico (TBA) al 0.37 %. Fue realizada una agitación en vortex y calentamiento en baño de agua a ebullición durante 20 min, deteniendo la reacción por enfriamiento de las muestras (3-5 °C). Se adicionaron 2 mL de n-butanol en los tubos, siendo centrifugados a 3000 xg/10 min. El espectrofotómetro fue ajustado con n-butanol, leyéndose la fase orgánica (rosa) a una longitud de onda de 532 nm. Para el blanco se realizó el mismo procedimiento, pero con ausencia de la muestra. Los resultados fueron expresados como % de inhibición de las LDL, el cual se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ inhibición de oxidación LDL} = \frac{\text{Absorbancia blanco} - \text{Absorbancia muestra}}{\text{Absorbancia blanco}} * 100$$

7. Métodos estadísticos

a. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental central compuesto rotatable de segundo orden con un valor $\alpha=1.682$ (**Cuadro 4**), teniendo como variables independientes temperatura de extrusión (TE, °C), velocidad de tornillo (VT, rpm) y harina de garbanzo extrudido (CG, %), con cinco niveles cada una arrojando un total de 20 tratamientos (**Cuadro 5**). Los niveles de los factores de estudio se eligieron mediante un estudio preliminar e información bibliográfica. Las condiciones óptimas de procesamiento por extrusión se obtuvieron a partir de la metodología de superficie de respuesta (MSR) para producir pastas alimenticias sin gluten con buenas propiedades de cocción y fitoquímicas.

Cuadro 4. Diseño experimental central compuesto rotable, de tres variables independientes temperatura de extrusión (X1, TE), velocidad de tornillo (X2, VT) y contenido de harina de garbanzo extrudido (X3, CG) ($\alpha = 1.682$).

Factores	-α	-1	0	+1	+α
Temperatura de extrusión (°C)	90.18	97	107	117	123.82
Velocidad de tornillo (rpm)	76.64	93	117	141	157.36
Harina de garbanzo extrudido (%)	0.23	5	12	19	23.77

Cuadro 5. Diseño experimental del estudio de extrusión de tres factores

Tratamientos	Variables independientes					
	Niveles codificados			Niveles decodificados		
	X ₁	X ₂	X ₃	TE (°C)	VT (rpm)	CG (%)
1	-1	-1	-1	97	93	5
2	1	-1	-1	117	93	5
3	-1	1	-1	97	141	5
4	1	1	-1	117	141	5
5	-1	-1	1	97	93	19
6	1	-1	1	117	93	19
7	-1	1	1	97	141	19
8	-1.682	1	1	117	141	19
9	1.682	0	0	90.18	117	12
10	0	0	0	123.8	117	12
11	0	-1.682	0	107	76.6	12
12	0	1.682	0	107	157.3	12
13	0	0	-1.682	107	117	0.23
14	0	0	1.682	107	117	23.7
15	0	0	0	107	117	12
16	0	0	0	107	117	12
17	0	0	0	107	117	12
18	0	0	0	107	117	12
19	0	0	0	107	117	12
20	0	0	0	107	117	12

TE= Temperatura de extrusión; VT= Velocidad de tornillo; CG= Contenido de harina de garbanzo extrudido.

b. Análisis de datos

Para la regresión múltiple (MSR) y predicción del comportamiento experimental de los datos se usaron los modelos cuadráticos con el programa estadístico Design Expert (Stat-Ease, 2018) versión 11.0. Se utilizó el modelo matemático siguiente:

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_1^2X_1^2 + b_2^2X_2^2 + b_3^2X_3^2 + b_1b_2X_1X_2 + b_1b_3X_1X_3 + b_2b_3X_2X_3$$

Y_i es la variable de respuesta, X_1 = temperatura de extrusión (TE), X_2 = velocidad de tornillo (VT), X_3 = contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), siendo b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_1^2 , b_2^2 , b_3^2 , b_1b_2 , b_1b_3 y b_2b_3 los coeficientes de regresión. Las correlaciones de Pearson se realizaron utilizando el paquete estadístico Statistica 7.0 (Statsoft, 2004), mientras que las comparaciones de medias se realizaron con la prueba LSD, utilizando el programa estadístico Design Expert (Stat-Ease, 2018) versión 11.0.

c. Optimización del proceso

Fue utilizado el método numérico para encontrar la combinación de los factores de estudio en donde se obtengan las pastas alimenticias tipo espagueti libres de gluten con las mejores propiedades de cocción y contenido de compuestos fenólicos, utilizando el programa estadístico Design Expert 11.0. Las variables dependientes utilizadas para la optimización fueron tiempo de cocción (TC), pérdidas de sólidos por cocción (PSPC), compuestos fenólicos totales (CFT), y parámetro de color b (b^*).

8. Fibra dietaria

Los análisis de fibra dietaria se realizaron de acuerdo con la metodología AOAC (2012) método 985.29, y Prosky y col (1988). Este ensayo fue realizado en la pasta control sin garbanzo, pasta óptima, y pasta comercial. La metodología se basó en la eliminación del almidón y proteínas mediante el kit enzimático TDF-100^a (Sigma-

Aldrich, San Luis, Mi, EUA). 1 gramo de muestra se mezcló con una solución tampón de fosfatos, siendo gelatinizada con α -amilasa termoestable. Se realizó una digestión con las enzimas proteasa y amiloglucosidasa, realizando diferentes ajustes de pH en la solución sometida a calentamiento y enfriamiento. El residuo se filtró y se lavó con agua, quedando guardado para su uso posterior. Asimismo, el residuo se volvió a lavar con etanol y acetona, se secó y pesó para obtener la fibra dietaria insoluble (FDI). Se agregaron cuatro volúmenes de etanol a los filtrados y lavados con agua previamente guardados para precipitar la fibra dietética soluble (FDS). El precipitado fue filtrado (Martin-Cabrejas y col 1995), lavado con etanol y acetona, secado y pesado. Se determinó el contenido de proteína residual y cenizas, reportándose los valores de FDI y FDS en porcentaje.

9. Métodos nutrimentales

a. Digestibilidad proteínica *in vitro*

Fue determinada utilizando la metodología reportada por Rathod y Annapure (2016) con ligeras modificaciones. 1 g de material fue pesado e incubado a 37 °C / 3 h con una solución (15 mg de pepsina en 20 mL de HCl 0.1 N neutralizada con 10 mL NaOH 0.2 N). Fueron agregados 7.5 mL de una solución reguladora de fosfatos (con pH=8) conteniendo 40 mg de pancreatina. Fueron incubados a una temperatura de 37 °C durante 24 horas, posteriormente fueron añadidos 700 μ L de ácido tricloroacético (ATA), y centrifugados a 5,000 $xg/10$ min. El sobrenadante fue descartado, siendo el precipitado deshidratado (40-50 °C) y subsecuentemente empleado en la digestión de proteínas utilizando el sistema MicroKjehldal. La digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) (%) se calculó como:

$$DPIV (\%) = [(Proteína\ total - Residuo\ de\ Proteína)/(Proteína\ total)]x100$$

b. Perfil de aminoácidos

La determinación del perfil de aminoácidos esenciales se realizó en la pasta obtenida en condiciones óptimas, siguiendo la metodología interna del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (INCMNSZ 2011) mediante cromatografía de intercambio iónico MME-AA-01 y MME-AA-02 y espectrofotometría ultravioleta visible MME-AA-03. Los resultados obtenidos fueron comparados en relación a los valores estándares de la FAO/WHO (2013) para aminoácidos esenciales.

c. Perfil de minerales

El perfil de minerales se determinó con el uso de espectrofotometría de absorción atómica (Agilent Technologies, modelo 240FS AA, modalidad flama), conforme al método reportado por la AOAC (2012). La metodología se fundamenta en la capacidad para la absorción de la luz de los átomos libres en estado fundamental a una determinada longitud de onda (LO). Se cuantificó el contenido de los minerales: calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, manganeso, cobre y zinc, realizando la determinación a una LO de 422.7 nm, 285.2 nm, 769.9 nm, 589.9 nm; 248.3 nm, 279.5 nm, 324.8 nm y 213.9 nm, respectivamente. Se utilizaron lámparas de cátodo hueco excepto en la medición de sodio (Na) y potasio (K), los cuales fueron determinados solamente por emisión. Las mediciones fueron realizadas empleando flama aire-acetileno excepto Ca y Mg en donde fue utilizada flama de óxido nitroso-acetileno. Se utilizó la absorbancia como tipo de medida, excepto K y Na que fueron determinados mediante emisión. Las muestras fueron acondicionadas mediante el pesado de 1 g de muestra seca en crisoles de porcelana. Después, los materiales fueron calcinados a una temperatura de 550 °C/8 h utilizando una mufla (marca Thermo Scientific modelo F30430CM-33), dejándose en el equipo hasta alcanzarse la temperatura ambiente. En el crisol con los

materiales se agregaron 5 mL de ácido clorhídrico concentrado, siendo posteriormente filtrados utilizando papel filtro Whatman No. 1, para después recolectar el líquido mediante un matraz volumétrico de 100 mL. Al final fueron aforados utilizando agua destilada para proceder con la cuantificación de los minerales, efectuándose las mediciones por triplicado. Las curvas de calibración para los diferentes minerales fueron realizadas con un sistema automatizado de introducción y dilución de muestras (SIPS) y un sistema de bombeo de agua y muestra (SIPS) con acoplamiento al equipo.

Para la elaboración de las curvas de calibración fueron preparadas soluciones concentradas conocidas de los diferentes minerales (calcio 10 ppm, magnesio 10 ppm, potasio 100 ppm, sodio 100 ppm, hierro 10 ppm, manganeso 10 ppm, zinc 5 ppm y cobre 5 ppm).

10. Métodos microestructurales

a. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Este análisis se realizó en las materias primas sin proceso de extrusión, pasta óptima sin procesar y procesada, y la pasta control (arroz), de acuerdo a sugerencias descritas por Cárabez-Trejo y col (1989). Se utilizó un microscopio electrónico de barrido INCAx-sight, Oxford instruments, modelo 6650, utilizando un detector de electrones secundarios y campo de 10 KV. En el porta muestras de aluminio del equipo tipo PIN con 12 mm de diámetro fueron colocados los materiales molidos, siendo las imágenes obtenidas mayormente utilizando un acercamiento de 1200 X.

b. Difracción de rayos X y cristalinidad relativa

Se llevó a cabo esta determinación en las materias primas sin proceso de extrusión, pasta óptima sin procesar y procesada, y la pasta control (arroz). Las muestras fueron montadas en un difractómetro Philips X'Pert X-ray de acuerdo con el

procedimiento descrito por Martínez-Flores (1997). Se obtuvieron los difractogramas con un barrido de ángulo Bragg de 5°-35° en una escala de 2θ, operando a 30 KV y 16 mA, utilizando radiación de CuKα a una longitud de onda λ=1.5406 Å. Se calculó la cristalinidad relativa utilizando el método Hermen que fue reportado por Nara y col (1978) y Gómez y col (1989). El % de cristalinidad relativa fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de cristalinidad} = \frac{\text{Área de los picos}}{\text{Área total}}$$

11. Estudio *in vivo* del índice glicémico

El estudio *in vivo* del índice glicémico (IG) se realizó siguiendo la metodología descrita por Goñi y Valentín-Gamazo (2003) con modificaciones de Granito y col (2014). Se seleccionaron doce voluntarios sanos de 20 ± 2 años, que no padecían diabetes mellitus ni ninguna enfermedad crónica. Se utilizaron las variables antropométricas peso, talla, e índice de masa corporal (IMC), que fue calculado a partir del peso y la talla. Se realizó una encuesta para garantizar que las personas no estuvieran tomando ningún medicamento o suplemento dietético ni estuvieran embarazadas. Los voluntarios dieron su consentimiento informado por escrito.

Cada persona consumió los tres alimentos de prueba (pan blanco, pasta control (CP) y pasta óptima (OP)) después de un ayuno nocturno. Cada voluntario participó en el experimento durante tres días no consecutivos. El primer día del experimento, las personas consumieron pan blanco (50 g). El segundo día ingirieron pasta control hervida (50 g), y el último día ingirieron pasta óptima hervida (50 g). Los alimentos se consumieron en un tiempo de 10 a 12 minutos, ingiriendo 250 mL de agua.

Las muestras de sangre se tomaron con la técnica de venopunción con ayuda de un vacutainer en ayunas, 30, 60 y 120 min después de cada comida, las cuales se recogieron en un tubo hermético con anticoagulante EDTA.

La cuantificación de glucosa se realizó mediante un espectrofotómetro digital semiautomático (Mindray BA-8 8), con reactivos Glucose-LQ Spinreact Lote: LIQ539, fecha de vencimiento 04-2024, siguiendo los estándares de control de calidad establecidos en el programa interno.

Los índices glucémicos se calcularon siguiendo el procedimiento de Goñi y Gamazo (2003) a partir del área incremental de glucosa en sangre en relación con el área correspondiente obtenida después de utilizar pan blanco de trigo como alimento de referencia.

Carga glucémica (CG): representa un parámetro derivado del valor de IG del alimento estudiado, siendo calculado con la siguiente ecuación:

$$CG = (IG * CHO)/100$$

Dónde:

IG: índice glicémico del alimento a evaluar.

CHO: carbohidratos presentes en el alimento por ración.

Los valores resultantes se categorizaron en CG alta >20, CG media 11-19 y CG baja <10 (Granito y col 2014).

12. Detección de gliadinas

Para la detección de gliadinas en las muestras se utilizó el kit comercial AgraStrip® Gluten G12, (Romer Labs, Austria). Se pesaron 0.2 g de muestra y se colocaron en el tubo de extracción, después se llenó el tubo con la solución de extracción hasta el nivel indicado. Se agitó por 1 minuto en vortex. Se transfirieron 3 gotas del extracto al tubo

de dilución y se completó con el buffer de dilución según el nivel de corte deseado, indicado por las marcas 5, 10 y 20 ppm. Se cerró el tubo de dilución y se agitó en vortex por 15 segundos. Se retiró la tapa y se introdujo una tira en forma vertical permitiendo que el líquido alcanzara el nivel indicado y se dejó reposar durante 45 segundos. Se retiró la tira del tubo de dilución y se colocó en forma vertical en una gradilla. Se dejó reposar durante 10 minutos para permitir que se desarrollara el análisis, transcurridos los 10 minutos se leen los resultados de manera inmediata, observando las tiras reactivas, donde si se marcaron ambas líneas corresponde a un resultado positivo, mientras que si solo se marca una línea corresponde a un resultado negativo.

13. Análisis sensorial

La aceptabilidad general se evaluó siguiendo la técnica reportada por Lim (2011). Se evaluaron las pastas alimenticias obtenidas a partir de la formulación óptima (PO) y una pasta alimenticia control (PC), mediante una escala hedónica de nueve puntos, en donde 1= me disgusta extremadamente, 2= me disgusta mucho, 3= me disgusta moderadamente, 4= me disgusta, 5= ni me gusta ni me disgusta, 6= me gusta, 7= me gusta moderadamente, 8= me gusta mucho, 9= me gusta extremadamente. Fueron seleccionados 120 panelistas no entrenados (60 hombres y 60 mujeres) para evaluar las pastas alimenticias, en donde como principal criterio de selección se les cuestionó si les gusta consumir algún tipo de pasta y que, además, su edad fuera mayor a 17 años. De los panelistas seleccionados, 60 panelistas recibieron una breve descripción de la información nutricional de las pastas y sus beneficios, la cual, se les pidió que leyeran, tres veces, y posteriormente observaran, olieran y probaran el producto. Finalmente, los panelistas completaron un cuestionario para expresar su nivel general

de aceptabilidad, así como los atributos (color, textura y sabor) de cada producto. Los 60 panelistas restantes realizaron el procedimiento descrito anteriormente sin haber recibido la información nutricional de las pastas. Además, según la escala utilizada por Whitlark y col (1993) con algunas modificaciones, se evaluó la intención de compra, donde 1= sí comprará, 2= muy probablemente comprará, 3= tal vez compre, 4= muy probablemente no comprará, 5= definitivamente no comprará.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

1. Composición proximal

En el análisis de la composición química de las materias primas (**Cuadro 6**) utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten por extrusión, se encontró que los valores de la harina de arroz quebrado (AQ) fueron similares a los reportados por Feizollahi y col (2018) en arroz de variedad Hashemi y Tarom. De igual forma, los valores de composición proximal de la harina de garbanzo extrudido (HG) son ligeramente menores a los reportados por Chávez-Ontiveros y col (2022), con excepción de carbohidratos. Esto podría deberse a las diferentes condiciones de procesamiento de las materias primas y a las condiciones agronómicas y temporales de su cultivo. A partir de los resultados obtenidos de la composición proximal de la harina de garbanzo extrudido, se observó que esta materia prima mostró un elevado contenido de fibra cruda, además de proteínas, por lo que al combinarse con la harina de arroz quebrado para la elaboración de pastas alimenticias sin gluten se obtiene un producto con buenas propiedades nutrimentales.

2. Tamaño de partícula de las materias primas

En los **Cuadros 7A y 7B** se muestra el tamaño medio de partícula de la harina de arroz quebrado y harina de garbanzo extrudido, respectivamente. Al calcular el tamaño medio de partícula de la harina de arroz quebrado, se obtuvo un valor promedio de $\approx 208.93 \mu\text{m}$. En el **cuadro 7A** se puede apreciar que la mayor parte de la harina de

Cuadro 6. Composición química (base seca) de las materias primas utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten mediante el proceso de extrusión.

Compuestos (%)	Harina de arroz quebrado	Harina de garbanzo extrudido
Humedad	9.76 ± 0.01	6.24 ± 0.02
Cenizas	0.63 ± 0.02	3.79 ± 0.03
Extracto etéreo	0.45 ± 0.01	5.10 ± 0.23
Proteínas	7.4 ± 0.01	19.83 ± 0.23
Fibra cruda	2.34 ± 0.17	9.48 ± 0.17
Carbohidratos*	89.18 ± 0.20	61.80 ± 0.10

Media ± Desviación estándar

*Calculado por diferencia de 100

Cuadro 7. Distribución de tamaño de partícula de las materias primas utilizadas en el proceso de extrusión (A: harina de arroz quebrado y B: harina de garbanzo extrudido).

A

# Malla	Abertura (µm)	Promedio (g)
20	840	0.08 ± 0.01
40	420	0.07 ± 0.04
60	250	43.25 ± 0.71
80	177	16.12 ± 0.35
100	149	28.20 ± 0.73
200	74	10.05 ± 0.23
<200	<74	2.22 ± 0.23

B

# Malla	Abertura (µm)	Promedio (g)
20	840	0.06 ± 0.01
40	420	0.08 ± 0.01
60	250	93.87 ± 0.42
80	177	1.78 ± 0.25
100	149	2.33 ± 0.16
200	74	1.80 ± 0.06
<200	<74	0.09 ± 0.03

arroz quebrado ($\approx 71\%$) se encontró distribuida principalmente en la malla 60 (250 μm) y 100 (149 μm).

Para el caso de la harina de garbanzo extrudido se obtuvo un valor de $\approx 205.46\ \mu\text{m}$. En el **cuadro 7B** se observa que cerca del 93.8 % de la harina de garbanzo quedó retenida en la malla 60 (250 μm). Diversos autores han reportado que tamaños medios de partículas más pequeños dan como resultado una pasta alimenticia más compacta, firme y con mayor dureza, generando una superficie más lisa y mejorando la masticabilidad de los fideos cocidos (Niu y col 2014; Steglich y col 2015).

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de tamaño de partícula para las materias primas, se puede decir que estas presentaron características apropiadas para la elaboración de las pastas alimenticias debido a su tamaño medio homogéneo.

3. Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad en agua (ISA) de las materias primas

Se realizaron las pruebas de índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) en las materias primas (**Cuadro 8**) utilizadas en el proceso de extrusión, encontrando un valor de IAA para la harina de arroz quebrado de 2.10 g de agua absorbida/g sólidos secos (g.a.a./g.s.s.) y de ISA de 0.53 %. Para el caso de la harina de garbanzo extrudido, se encontró un valor de IAA de 3.83 g.a.a./g.s.s. y de ISA de 25.29 %. Los mayores valores de IAA e ISA se presentaron en ambos casos en la harina de garbanzo extrudido, esto podría deberse al contenido más elevado de fibra dietaria encontrado en dicha materia prima.

Cuadro 8. Índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua de las materias primas utilizadas en el proceso de extrusión para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten.

Muestra	Índice de absorción de agua (g.a.a./g.s.s.)	Índice de solubilidad en agua (%)
Harina de arroz quebrado	2.10 ± 0.03	0.53 ± 0.02
Harina de garbanzo extrudido	3.83 ± 0.08	25.29 ± 0.09

Media ± Desviación estándar

Mokni y col (2015) obtuvieron valores cercanos para IAA e ISA en harina de garbanzo, reportando valores de 5.14 g.a.a./g.s.s. y 22.62 % para IAA e ISA, respectivamente.

Diversos autores han reportado que al incrementar el contenido de proteínas en pastas elaboradas a base de arroz con la adición de leguminosas se ve disminuida la lixiviación de almidón disminuyendo el ISA y favoreciendo la obtención de una pasta con mejores propiedades de cocción, generando una disminución de la pérdida de sólidos por cocción (Udachan y Sahoo 2017). Por lo anterior, se puede esperar que la harina de garbanzo extrudido al contener altos contenidos de proteínas es una materia prima adecuada para la elaboración de pastas alimenticias en combinación con la harina de arroz quebrado.

B. ESTUDIO PRELIMINAR DE EXTRUSIÓN

Se realizó un estudio preliminar de extrusión con el objetivo de fijar las diferentes condiciones de procesamiento, así como los factores de estudio y sus niveles de variación. Se fijó el contenido de humedad a 28 %, la temperatura de alimentación a 75 ± 1 °C, y la temperatura de salida a 80 ± 1 °C, en base al estudio preliminar, revisión bibliográfica sobre pastas alimenticias elaboradas por extrusión, y a un trabajo de investigación realizado por Pérez-Murillo (2015), quien elaboró mediante el proceso de extrusión pastas alimenticias elaboradas a partir de sémola de trigo, maíz amarillo y cáscara de calabaza Cehualca. Asimismo, en el presente estudio se determinó utilizar como base en la formulación a la harina de arroz quebrado con el fin de otorgarle valor agregado a este subproducto de la molienda del arroz, y obtener una pasta alimenticia libre de gluten debido a las propiedades hipoalergénicas del arroz.

Se realizaron pruebas para fijar los niveles de los factores de estudio, que fueron temperatura de extrusión (TE), velocidad de tornillo (VT) y contenido de harina de garbanzo extrudido (CG). A partir del estudio se concluyó que un rango de temperaturas de 90.18 a 123.8 °C era el adecuado, ya que al aumentar la temperatura por encima de 124 °C las pastas comenzaban a expandirse al salir del extrusor, lo cual es una característica no deseada en este tipo de alimento. Asimismo, cuando se utilizaban temperaturas menores a 90 °C, las pastas obtenidas no se formaban correctamente y eran quebradizas. Para el caso de la VT, se fijaron niveles entre 76.6 y 157.3 rpm, ya que se pudo observar que cuando se utilizaron VT por encima de 158 rpm las pastas se adelgazaban y tenían una estructura muy frágil; en el caso de condiciones de VT por debajo de 76 rpm, los materiales no fluían adecuadamente dentro del extrusor y provocaban problemas en el funcionamiento del equipo. Para el caso del factor CG, se decidió fijar un porcentaje máximo en las mezclas de 23.77 %, ya que se observó que, al adicionar concentraciones de harina de garbanzo extrudido superiores al 24 %, las pastas no presentaban una buena integridad y mostraban malas propiedades de cocción.

C. ESTUDIO DE EXTRUSIÓN.

Una vez establecidas las concentraciones de las materias primas a utilizar para la elaboración de las pastas alimenticias libres de gluten, y los niveles de los factores de estudio mediante el estudio preliminar de extrusión, se llevó a cabo el estudio de extrusión planteado, cuyos resultados principales se discuten a continuación.

1. Análisis físicos y fisicoquímicos

El **Cuadro 9** muestra el análisis de varianza para las variables de respuesta índice de expansión (IE), índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA) y parámetros de color (L^* , b^* y ΔE). Se presentaron modelos de regresión significativos ($p < 0.05$), con valores de $R^2_{ajustada} \geq 0.75$, coeficientes de variación (CV) entre 1.19 y 6.67, y los modelos no presentaron falta de ajuste ($p > 0.05$).

a. Índice de expansión (IE)

Para el análisis de la variable de respuesta índice de expansión (IE) se utilizó un modelo cuadrático, el cual fue significativo ($p < 0.01$), con un valor de $R^2_{ajustada} = 0.88$, coeficiente de variación (CV) = 2.12%, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.16$) (**Cuadro 9**). El análisis estadístico de los datos dio como resultado que el factor de estudio temperatura de extrusión (TE) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$), pero no tuvo efecto significativo en su término cuadrático (TE², b_2 , $p = 0.56$). Por otro lado, el factor velocidad de tornillo (VT) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p < 0.01$). Para el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este no tuvo efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p = 0.24$), pero sí tuvo efecto en su término cuadrático (CG², b_{33} , $p < 0.01$). Por otro lado, la interacción TE*VT (b_{12} , $p = 0.69$) no tuvo efecto significativo, mientras que las interacciones TE*CG (b_{13} , $p = 0.05$) y VT*CG (b_{23} , $p = 0.01$) sí presentaron efecto significativo (**Cuadro 10**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

Cuadro 9. Análisis de varianza de las respuestas físicas y fisicoquímicas de las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de garbanzo extrudido.

Respuesta	R² (ajustada)	CV (%)	Valor F	p de F (Modelo)	Falta de Ajuste
IE	0.88	2.12	17.52	<0.001	0.16
ISA	0.96	4.99	65.25	<0.0001	0.07
IAA	0.97	2.00	72.16	<0.0001	0.06
L	0.83	3.78	11.96	0.0003	0.16
b*	0.77	4.55	0.06	0.0015	0.90
ΔE	0.75	5.99	7.33	0.0022	0.17

CV= Coeficiente de variación; IE= Índice de expansión; IAA= Índice de absorción de agua; ISA= Índice de solubilidad en agua; L= Luminosidad; b*= Azul-Amarillo y ΔE= Diferencia total de color entre pasta sin procesar y la pasta procesada por extrusión.

Cuadro 10. Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las respuestas físicas y fisicoquímicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.

	IE	IAA	ISA	L	b*	ΔE
Intercepto	0.98	3.86	4.48	55.16	28.53	39.52
Lineal						
TE (b ₁)	-0.04 (<0.01)	-0.18 (<0.01)	0.73 (<0.01)	-3.60 (<0.01)	0.30 (0.39)	3.22 (<0.01)
VT (b ₂)	0.03 (<0.01)	0.37 (<0.01)	-0.27 (<0.01)	0.31 (0.59)	1.03 (0.01)	-0.017 (0.97)
CG (b ₃)	-0.007 (0.24)	-0.14 (<0.01)	0.62 (<0.01)	-3.50 (0.01)	1.03 (0.01)	1.90 (0.01)
Cuadrático						
TE (b ₁₁)	-0.003 (0.56)	-0.13 (<0.01)	-0.75 (<0.01)	0.71 (0.46)	0.39 (0.32)	-0.48 (0.55)
VT (b ₂₂)	0.016 (<0.01)	0.004 (0.03)	0.42 (<0.01)	1.93 (0.56)	-1.34 (0.98)	-1.95 (0.29)
CG (b ₃₃)	0.02 (<0.01)	0.19 (<0.01)	-0.03 (<0.01)	0.076 (<0.01)	0.58 (<0.01)	0.15 (<0.01)
Interacciones						
TE*VT (b ₁₂)	-0.003 (0.69)	0.24 (<0.01)	0.60 (<0.01)	0.46 (0.37)	0.34 (0.38)	0.37 (0.56)
TE*CG (b ₁₃)	0.03 (0.05)	0.12 (0.87)	0.59 (<0.01)	-0.34 (0.02)	0.004 (0.01)	0.67 (0.03)
VT*CG (b ₂₃)	0.02 (0.01)	0.24 (<0.01)	-0.55 (0.72)	2.82 (0.92)	-2.02 (0.21)	-2.71 (0.85)

IE= Índice de expansión; IAA= Índice de absorción de agua; ISA= Índice de solubilidad en agua; L= Luminosidad; a*= Verde-Rojo; b*= Azul-Amarillo; ΔE = Diferencia total de color entre pasta sin procesar y la pasta procesada por extrusión; FF= Fuerza de flexión; TE= Temperatura de extrusión; VT= Velocidad de tornillo; CG= Contenido de harina de garbanzo extrudido.

$$IE = 0.98 - 0.04TE + 0.03*VT - 0.007*CG - 0.003*TE*VT + 0.016*TE*CG + 0.02*VT*CG - 0.003*TE^2 + 0.03*VT^2 + 0.02*CG^2$$

En la **Figura 6** se muestra el efecto de la TE y CG sobre el IE de las pastas alimenticias libres de gluten, a VT= 117 rpm. Puede observarse que a bajo CG, conforme se incrementó la TE los valores de IE disminuyeron, mientras que, a alto CG, conforme se incrementó la TE no se observaron cambios importantes en los valores de IE. Los mayores valores (> 1.1) de IE ocurrieron a bajos (<5%) CG y a bajas (<100 °C) TE. Asimismo, los menores valores (<0.95) de IE se presentaron a altas TE combinadas con valores intermedios (6-15%) de CG. Este comportamiento fue posiblemente debido a que a altas TE, en el intervalo estudiado, se favoreció la formación de complejos almidón-proteína, lo que permitió mantener la estructura compacta de la pasta, obteniéndose bajos valores de IE. Los valores de IE obtenidos en el presente estudio son ligeramente inferiores a los reportados por Wójtowicz y col (2020), quienes elaboraron pasta a partir de trigo blando espalta integral, reportando valores de IE entre 1.1 y 1.49. Asimismo, los valores del presente trabajo coinciden con los reportados por Sobukola y col (2012), quienes reportaron que al incrementar la TE el IE disminuyó, presentando valores entre 0.93 y 1.25 en pastas obtenidas a partir d almidón de ñame blanco y grano cervecero. En la **Figura 6** se muestra el efecto de la VT y CG sobre el IE de las pastas alimenticias libres de gluten a una TE constante de 107 °C. Puede observarse que a bajo CG, conforme se incrementa la VT los valores de IE disminuyeron hasta VT intermedias, mientras que, al continuar incrementando los valores de VT el IE aumentó.

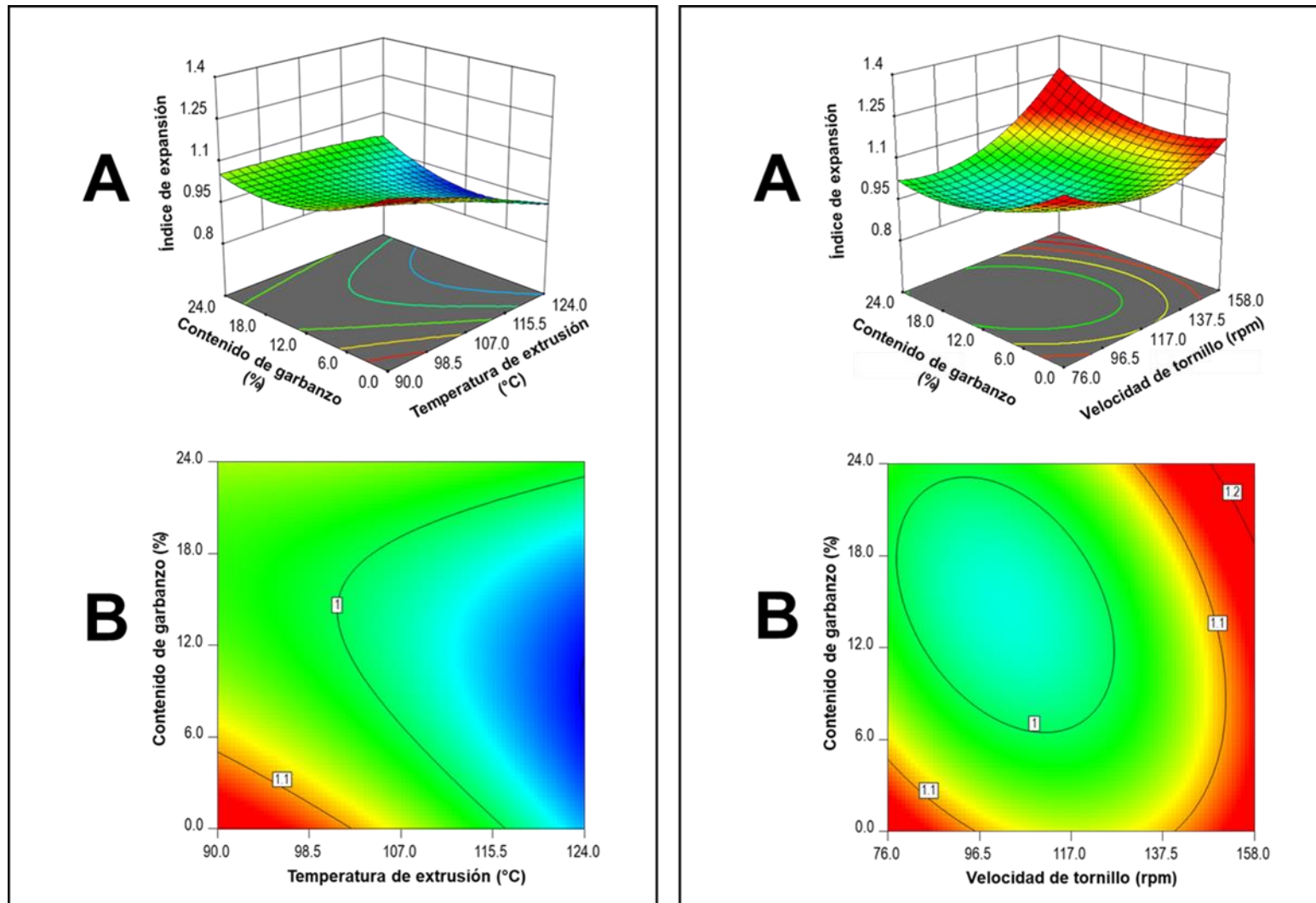


Figura 6. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre el índice de expansión (IE) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.

Los menores valores (<1) de IE se presentaron en un punto mínimo, en condiciones de CG intermedios (10-15%) combinados con VT (90-117 °C). Este comportamiento fue probablemente debido a que a altos CG se encuentran en mayor cantidad compuestos como la fibra dietaria y proteínas, presentándose menos almidón en la mezcla, lo cual favoreció la formación de una estructura más densa y, consecuentemente, una menor expansión. Esto coincide con lo reportado por Wójtowicz y Mościcki (2014), quienes observaron que la disminución del IE al aumentar el nivel de leguminosas puede deberse al mayor contenido de proteínas y fibra, y menor cantidad de almidón de estos materiales. Wang y col (2012) reportaron que un aumento del contenido de proteína y fibra en el material de estudio aumenta la viscosidad de la masa dentro del extrusor, lo que resulta en un tiempo de residencia más prolongado y una tasa de cizallamiento más alta, causando una degradación molecular en la amilopectina (mayor grado de descomposición del almidón), generando una disminución en el IE.

Igualmente, Bouasla y col (2017) reportaron que al adicionar legumbres en la formulación de una pasta alimenticia a base de arroz, el IE disminuyó, reportando valores de 1.55, 1.42-1.48, y 1.42-1.51 para pastas de arroz, arroz adicionado con guisante amarillo, y arroz adicionado con lenteja, respectivamente.

b. Índice de absorción de agua (IAA)

Para el análisis de la variable de respuesta índice de absorción de agua (IAA) se utilizó un modelo cuadrático, el cual fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.97$, $CV = 2.00\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.06$) (**Cuadro 9**). Se obtuvo a partir del análisis estadístico de los datos que la temperatura de extrusión

presentó efecto significativo tanto en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$) como en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p < 0.01$). De igual manera, la variable velocidad de tornillo (VT) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p < 0.001$) y en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p = 0.03$). En el caso del factor de estudio contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), también mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p < 0.01$) y cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p < 0.01$). En el caso de las interacciones TE*VT (b_{12} , $p < 0.01$) y VT*CG (b_{23} , $p < 0.01$) presentaron efecto significativo, mientras que la interacción TE*CG (b_{13} , $p = 0.87$) no presentó efecto significativo (**Cuadro 10**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{IAA} = 3.86 - 0.18*TE + 0.37*VT - 0.14*CG - 0.13*TE*VT + 0.004*TE*CG + 0.19*VT*CG + 0.24*TE^2 + 0.12*VT^2 + 0.24*CG^2$$

En la **Figura 7** se muestra el efecto de la TE y CG sobre el IAA de las pastas libres de gluten obtenidas a una VT= 117 rpm. Puede observarse que los menores valores de IAA (<4 g.a.a. / g.s.s.) se encontraron en un punto mínimo localizado a CG medios (8-18 %) y TE medias (100-117 °C). Conforme se desplaza hacia los extremos de CG y TE los valores de IAA tienden a aumentar, teniendo tres zonas con mayores valores de IAA (>5 g.a.a. / g.s.s.), la primera a alto (>18 %) CG y baja (<95 °C) TE, la segunda a bajo (<6 %) CG y baja (<98.5 °C) TE siendo donde se presentaron los mayores valores de IAA, y la tercera a bajo (<3 %) CG y alta (>120 °C) TE. En el presente estudio el IAA presentó una alta correlación positiva con IE ($r = 0.74$, $p < 0.001$). Este comportamiento puede deberse a que en la zona con mayor IAA (bajos CG y TE) se presenta la mayor cantidad de almidón aportado por la harina de arroz quebrado (HAQ)

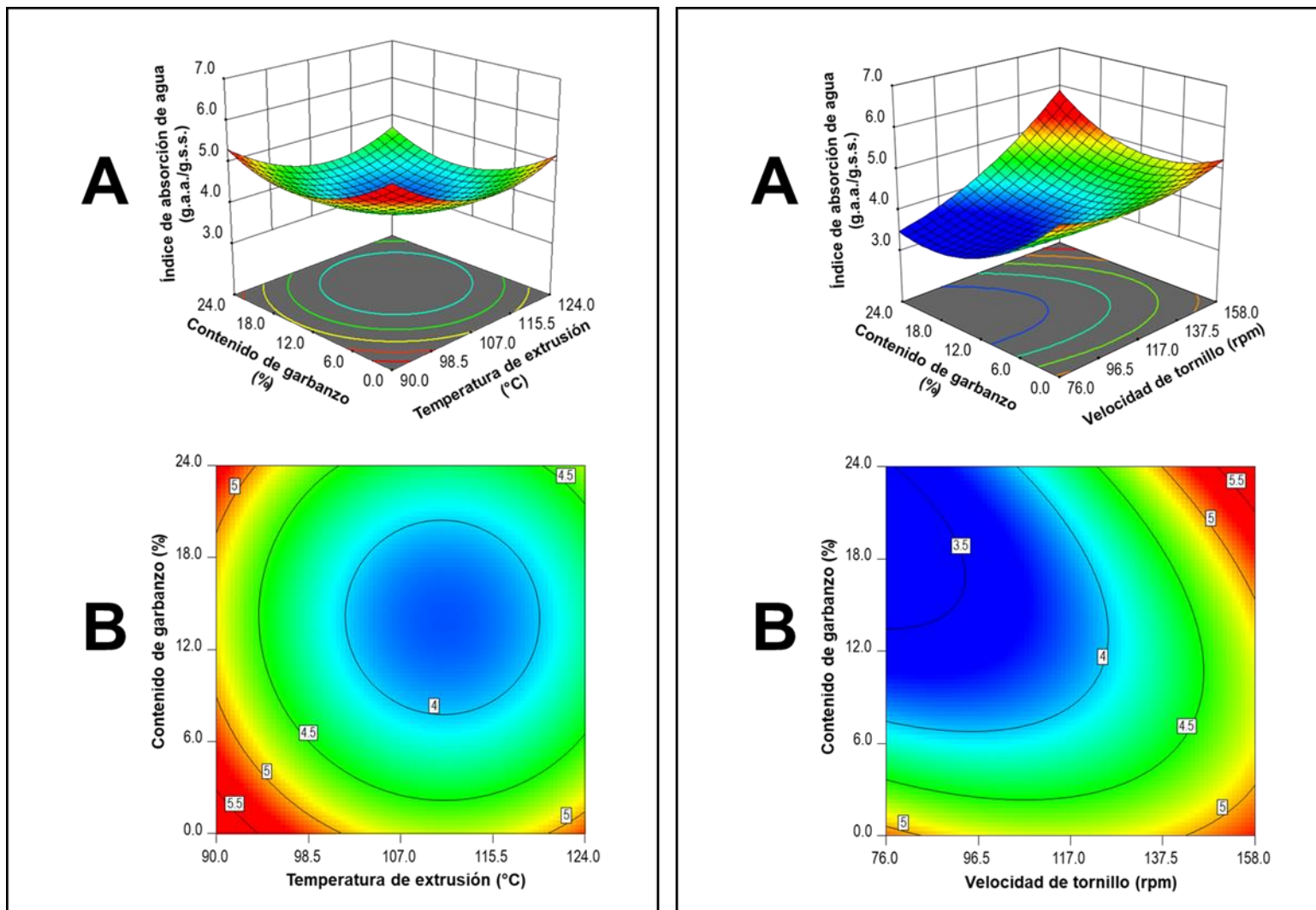


Figura 7. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) sobre el índice de absorción en agua (IAA) (TE) 107 °C de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.

favoreciendo la absorción de agua, y a que las bajas TE no dañaron tan severamente los gránulos del mismo. El IAA varió en todo el diseño de 3.67 a 5.24 g.a.a./g.s.s., siendo estos datos mayores a los obtenidos en pastas comerciales sin gluten 1.71 ± 0.02 g.a.a./g.s.s. Esto concuerda con lo reportado por Wang y col (2017), quienes elaboraron una pasta de arroz adicionada con salvado del mismo cereal, donde observaron que al incrementar el contenido de fibra aportada por el salvado disminuyó el IAA. Esto fue atribuido a que al incrementar la fibra se presentó una disminución del contenido de almidón, generando una competencia entre la fibra y el almidón por el agua. De igual manera, Wójtowicz y col (2014) reportaron un comportamiento similar en una pasta de trigo blando adicionada con lenteja, donde al incrementar la cantidad de lenteja (rica en fibra) disminuyó el IAA.

En la **Figura 7** se muestra el efecto de la VT y CG sobre el IAA de las pastas alimenticias libres de gluten a TE = 107°C. Puede observarse que los menores valores de IAA (<3.5 g.a.a. / g.s.s.) se encontraron en un punto mínimo localizado a contenidos altos (>12 %) de CG y bajas (<68.5 rpm) VT. Fuera de ese punto los valores de IAA tienden a aumentar, teniendo tres zonas con mayores valores de IAA (>5 g.a.a. / g.s.s.). La primera a bajo (<2 %) CG y baja (<96 rpm) VT, la segunda a alto (>12 %) CG y alta (>137 rpm) VT, y la tercera a bajo (<3 %) CG y alta (>137 rpm) VT.

Los menores valores de IAA obtenidos combinando altos (>12 %) CG y bajas (<68.5 rpm) VT pueden atribuirse a que, al incrementar el CG, disminuyó el contenido de almidón relativo de las muestras, por efecto de la disminución de la harina de arroz, reduciéndose la absorción de agua. Asimismo, al disminuir la VT disminuyó el daño mecánico por efecto de la cizalla dentro del extrusor, disminuyendo la modificación de

la estructura de los gránulos del almidón y, en consecuencia, el IAA. Esto concuerda con Sobukola y col (2013) quienes reportaron que cuando se lleva a cabo un rompimiento de la estructura del gránulo de almidón, se une una mayor cantidad de agua a dicha molécula.

c. Índice de solubilidad en agua (ISA)

Para el análisis de la variable de respuesta índice de solubilidad en agua (ISA) se utilizó un modelo cuadrático, el cual fue significativo ($p < 0.01$). Se obtuvo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.96$, $CV = 4.99\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.07$) (**Cuadro 9**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p < 0.01$). De igual manera, la velocidad de tornillo (VT) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p < 0.01$). En el caso del contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este factor también mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p < 0.01$). Para el caso de las interacciones TE*VT (b_{12} , $p < 0.01$) y TE*CG (b_{13} , $p < 0.01$), estas presentaron efecto significativo, mientras que la interacción VT*CG (b_{23} , $p = 0.72$) no presentó efecto significativo (**Cuadro 10**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{ISA} = 4.48 + 0.73*TE - 0.27*VT + 0.62*CG - 0.75*TE*VT + 0.42*TE*CG - 0.03*VT*CG \\ + 0.60*TE^2 + 0.59*VT^2 - 0.55*CG^2$$

En la **Figura 8** se muestra el efecto de la TE y CG sobre el ISA de las pastas alimenticias a una $VT = 117$ rpm. Puede observarse que existe una tendencia a

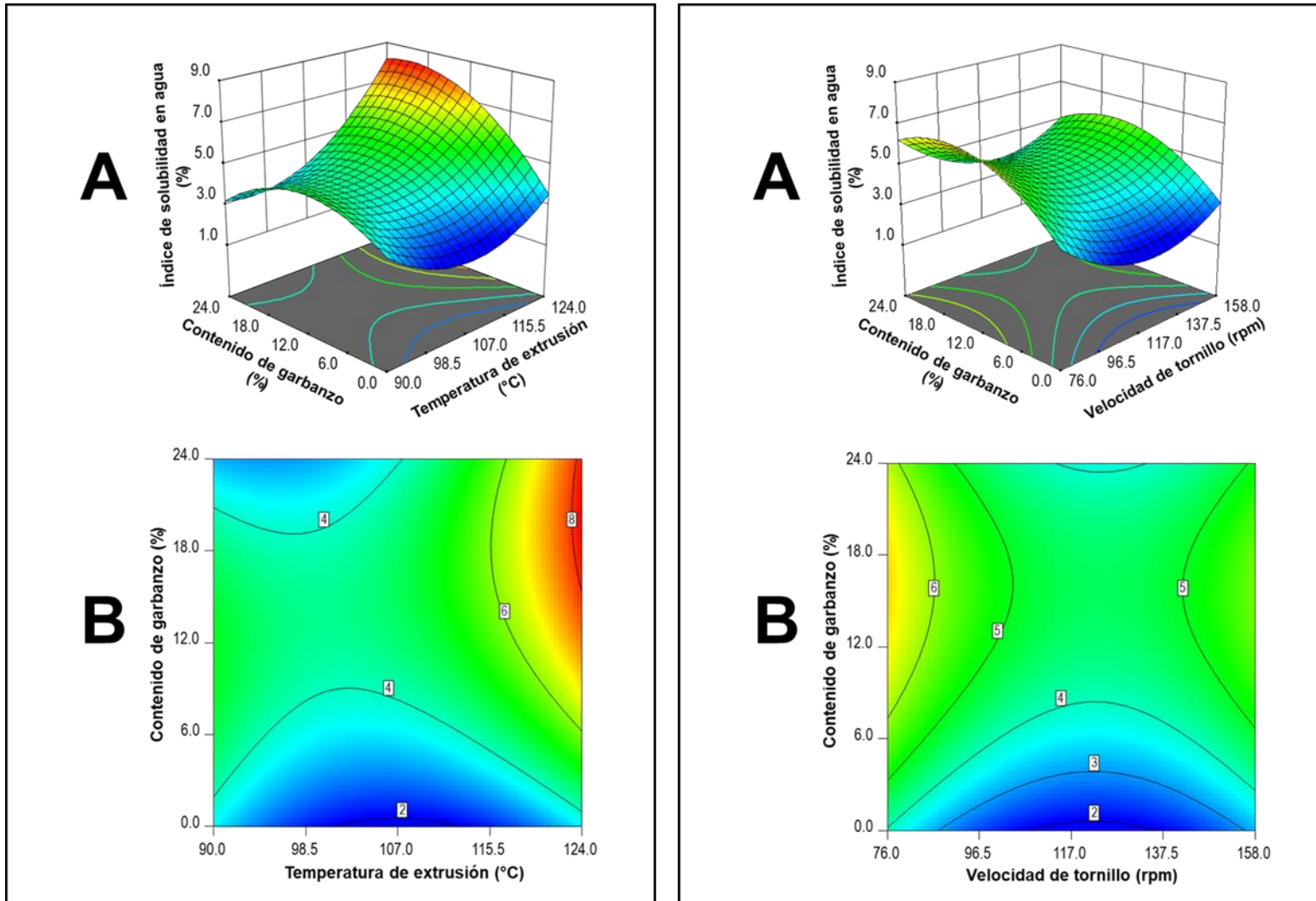


Figura 8. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre el índice de solubilidad en agua (IAA) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.

incrementar los valores de ISA al aumentar la TE en los diferentes CG. Los mayores valores (>6 %) de ISA se presentaron en condiciones de altas TE y CG.

Este comportamiento puede atribuirse a que a altas TE se presentó una alta degradación de polímeros como el almidón y fibra dietaria, aumentando la formación de azúcares de bajo peso molecular e incrementándose el ISA. Esto es similar a lo reportado por Laishram y Das (2017), quienes reportaron que al incrementar la TE se incrementó el ISA en pastas elaboradas a partir de arroz negro. Asimismo, al combinar altas TE (> 118 °C) con altos CG (> 13%) se incrementaron los valores de ISA. Este comportamiento pudo deberse al alto valor de ISA que presentó la materia prima harina de garbanzo (25.29 ± 0.09 %), el cual fue mayor al presentado por la harina de arroz quebrado (0.53 ± 0.02) que fue la otra materia prima utilizada para producir las pastas sin gluten. Havva y col (2021) elaboraron pastas alimenticias a base de sémola de trigo adicionadas con quinoa. Los valores de ISA encontrados en dicho trabajo para todas las pastas oscilaron entre 9.62% para la muestra control y 12.30% para la pasta con 100% de quinoa, siendo mayores a los valores de ISA encontrados en el presente estudio, los cuales variaron de 2.1 a 8.1 %. Los valores de ISA encontrados en el presente trabajo también fueron menores a los obtenidos en las pastas comerciales a base de arroz analizadas (8.50 ± 0.12 %)

En la **Figura 8** se muestra el efecto de la VT y el CG sobre el ISA de las pastas alimenticias libres de gluten a TE= 107°C. Puede observarse un comportamiento tipo silla, donde en todo el intervalo de VT estudiado, los valores de ISA se incrementan conforme se incrementa el CG hasta ~18%, arriba de este valor, el ISA muestra una ligera tendencia a disminuir y estabilizarse, en las condiciones estudiadas. Este

comportamiento se puede deber al alto contenido fibra dietaria soluble aportado por la HG, la cual por el efecto termomecánico de extrusión se degradó a azúcares con mayor solubilidad, incrementándose el ISA. Bouasla y col (2017) reportaron que el ISA aumentó significativamente al incrementar el contenido de leguminosas como la harina de guisante amarillo. Los valores incrementaron de 2.52% para la pasta que contenía 10 g/100 g, a 3.86% para la pasta con 30 g/100 g (harina de chícharos amarillos/harina de arroz). Asimismo, en el presente estudio a bajas VT (< 80 rpm) combinadas con CG (7-19%) se obtuvieron altos valores de ISA (> 6%), lo cual pudo deberse a un mayor tiempo de residencia de los materiales dentro del extrusor a menores VT, generando una mayor degradación estructural de la fibra y almidón.

d. Parámetro de color L*

El color es un parámetro importante para la aceptación de las pastas secas o cocidas por parte de los consumidores. El color de los alimentos, incluyendo la pasta sin aditivos, depende de la composición de las materias primas (pigmentos, proteínas, fibra dietética, fenoles, etc.) utilizadas en su elaboración (Sęczyk y col 2016).

Para el análisis de la variable de respuesta parámetro de color L*, se utilizó un modelo cuadrático el cual fue significativo ($p < 0.03$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.83$, CV= 3.78 %, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.16$) (**Cuadro 9**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$) pero no tuvo efecto en su término cuadrático (TE², b_2 , $p = 0.46$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.59$) ni en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p = 0.56$). En el caso

del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este factor mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p=0.01$) y en su término cuadrático (CG², b_{33} , $p<0.01$). En el análisis de las interacciones se obtuvo que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p=0.37$) y VT*CG (b_{23} , $p=0.92$) no presentaron efecto significativo, mientras que la interacción TE*CG (b_{13} , $p=0.02$) sí presentó efecto significativo (**Cuadro 10**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$L = 55.16 - 3.60*TE + 0.31*VT - 3.50*CG + 0.71*TE*VT + 1.93*TE*CG + 0.076*VT*CG + 0.46*TE^2 - 0.34*VT^2 + 2.82*CG^2$$

En la **Figura 9** se muestra el efecto de la TE y CG sobre el parámetro L* de color de las pastas alimenticias libres de gluten a VT= 117 rpm. Puede observarse que a bajo CG, conforme se incrementó la TE los valores de L* disminuyeron, mientras que, a alto CG, conforme se incrementó la TE no se observaron cambios importantes en los valores de L*. Los mayores valores (>70) de L* se presentaron a bajos (<6 %) CG y bajas (<107 °C) TE. En el presente estudio el parámetro L* presentó una moderada correlación negativa con el factor de estudio CG ($r= -0.49$, $p=0.02$). Este comportamiento puede ser debido a que a bajos CG se presentó un mayor contenido de arroz quebrado, que presenta mayor luminosidad (96.21) comparado con la harina de garbanzo (86.09), favoreciendo el incremento de L*. De igual manera, al incrementar la TE disminuyeron los valores de L*, lo cual pudo deberse a las reacciones de oscurecimiento de Maillard ocasionadas por las altas TE.

Esto concuerda con lo reportado por Arribas y col (2020), quienes reportaron que al incrementar el contenido de frijol en una pasta elaborada a partir de arroz y frijol disminuyeron los valores de luminosidad de las pastas, obteniendo valores de $87.02 \pm$

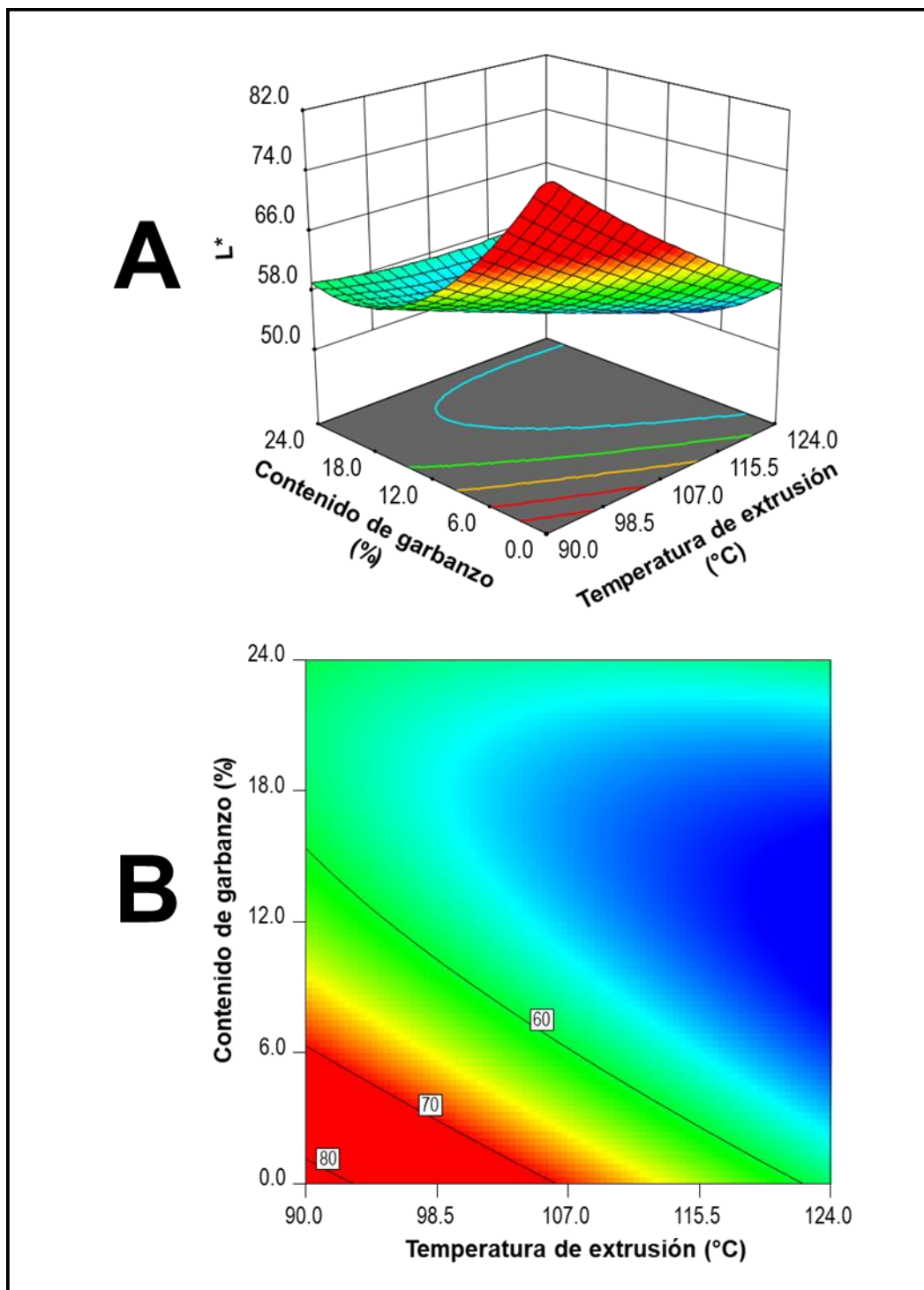


Figura 9. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) sobre el parámetro de color luminosidad (L^*) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

0.10 para pastas con 100% de arroz en su formulación, y 81.93 ± 0.16 para pastas con 100% de frijol. Asimismo, Rafiq y col (2017) reportaron un comportamiento similar en pastas elaboradas a partir de sémola de trigo adicionadas con un 40 % de arroz integral y 20 % de leguminosas, en donde el valor de L^* disminuyó de 52.53 ± 1.10 a 43.10 ± 1.46 al incrementar la TE de 70 a 110 °C, siendo estos valores menores a los reportados en el presente estudio.

e. Parámetro de color b^*

Para el análisis de esta respuesta se utilizó un modelo cuadrático, el cual fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.77$, $CV = 4.55\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.90$) (**Cuadro 9**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p = 0.39$) ni en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p = 0.32$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.01$) pero no tuvo efecto en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p = 0.98$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este factor mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p = 0.01$), así como en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p < 0.01$). En el análisis de las interacciones, se obtuvo que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p = 0.38$), y VT*CG (b_{23} , $p = 0.21$) no presentaron efecto significativo, mientras que la interacción TE y CG (TE*CG, b_{13} , $p < 0.01$) sí presentó efecto significativo (**Cuadro 9**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$b^* = 28.53 + 0.30*TE + 1.03*VT + 1.03*CG + 0.39*TE*VT - 1.34*TE*CG + 0.58*VT*CG + 0.34*TE^2 + 0.004*VT^2 - 2.02*CG^2$$

En la **Figura 10** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre el parámetro b^* de color de las pastas alimenticias libres de gluten obtenidas a $VT= 117$ rpm. Puede observarse que los menores valores de b^* (<22) se encuentran en dos zonas, la primera se encuentra a bajo (<3 %) CG en todo el rango de TE, y la segunda a alto (>22 %) CG combinado con altas (115.5 °C) TE. Asimismo, los mayores (>30) valores de b^* se presentaron a niveles medios-altos (10-20 %) de CG en todo el rango de TE.

Este comportamiento puede deberse a que al aumentar el CG se incrementó el contenido de pigmentos con coloración amarilla presentes en el garbanzo, principalmente carotenoides. Makdoud y Rosentrater (2017) observaron un comportamiento similar en pastas elaboradas a base de arroz, quinua y amaranto, en dicho trabajo se observó que el agregar amaranto contribuyó al amarillamiento de la pasta debido a los pigmentos carotenoides que aporta este pseudocereal.

Asimismo, el comportamiento obtenido en el presente estudio puede deberse a los valores de b^* presentados por las materias primas, donde la harina de garbanzo y la harina de arroz quebrado mostraron valores de b^* de 19.40 ± 0.49 y 7.04 ± 0.25 , respectivamente.

La disminución del parámetro b^* de color combinando altas TE (> 116 °C y CG ($>20\%$). Esto podría deberse a que durante el proceso de extrusión las enzimas lipoxigenasas pueden afectar a los pigmentos carotenoides mediante oxidación, disminuyendo la coloración de los alimentos, lo cual coincide con lo reportado por Belton y Taylor (2010).

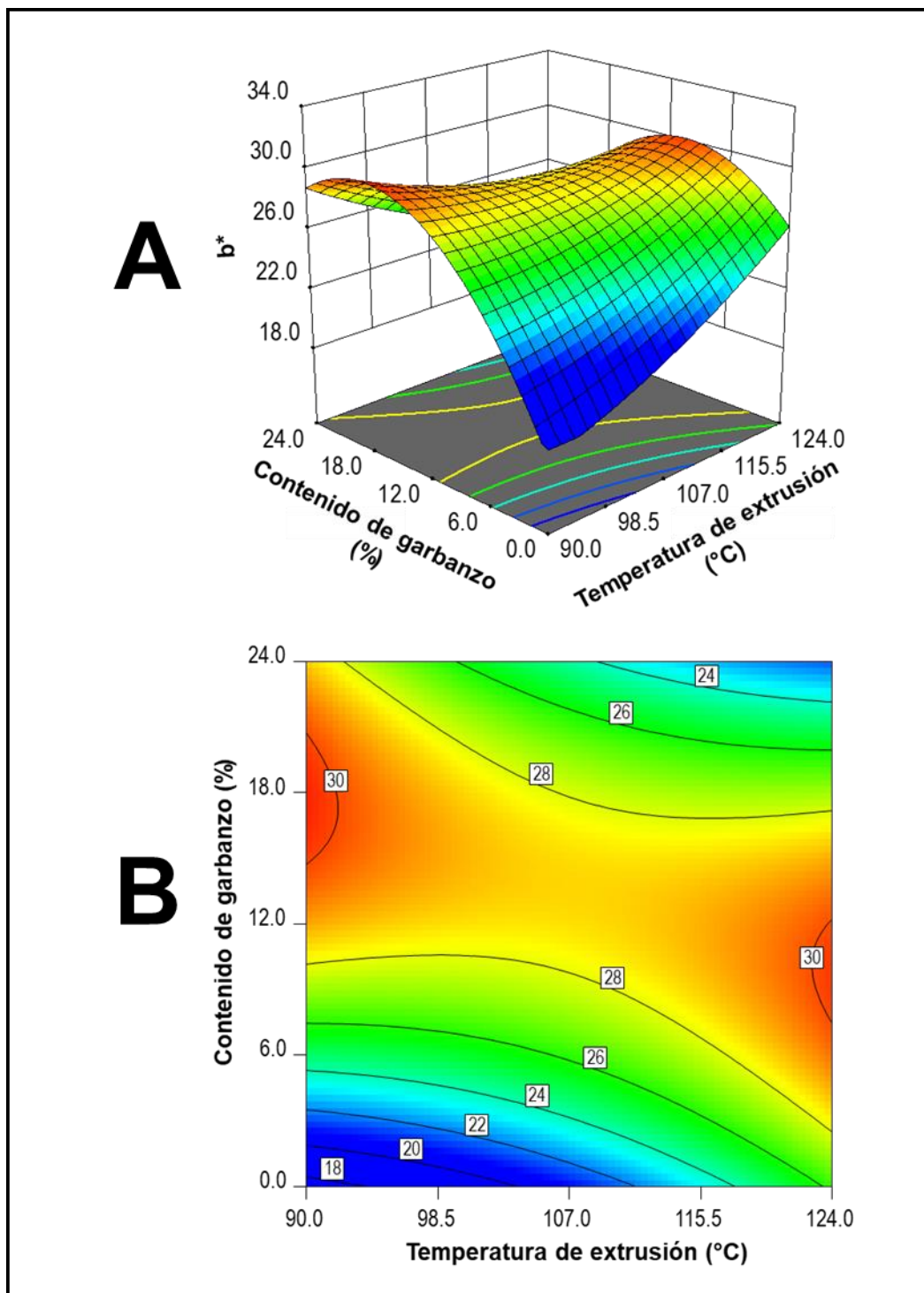


Figura 10. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el parámetro de color b^* de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

f. Diferencia total de color (ΔE)

Para el análisis de la variable de respuesta diferencia total de color (ΔE), se utilizó un modelo cuadrático el cual fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.75$, $CV = 5.99\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.17$) (**Cuadro 9**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$) pero no en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p = 0.55$). Por otro lado, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.97$) ni en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p = 0.29$). En relación al factor contenido de garbanzo extrudido (CG), este presentó efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p = 0.01$) y en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p < 0.01$). Asimismo, en el caso de las interacciones TE*VT (b_{12} , $p = 0.56$) y VT*CG (b_{23} , $p = 0.85$), no presentaron efecto significativo, mientras que la interacción TE*CG (b_{13} , $p = 0.03$) sí presentó efecto significativo (**Cuadro 10**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\Delta E = 39.52 + 3.22*TE - 0.017*VT + 1.90*CG - 0.48*TE*VT - 1.95*TE*CG + 0.15*VT*CG + 0.37*TE^2 + 0.67*VT^2 - 2.71*CG^2$$

En la **Figura 11** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre los valores de diferencia total de color (ΔE) de las pastas alimenticias libres de gluten a una VT= 117 rpm. Puede observarse que los mayores valores de ΔE (>40) se presentaron a niveles bajos-medios (0-18 %) CG combinados con altas (>115 °C) TE. En el presente estudio ΔE presentó una moderada correlación positiva con TE ($r = 0.54$, $p = 0.01$) y con el parámetro b^* de color ($r = 0.58$, $p < 0.001$).

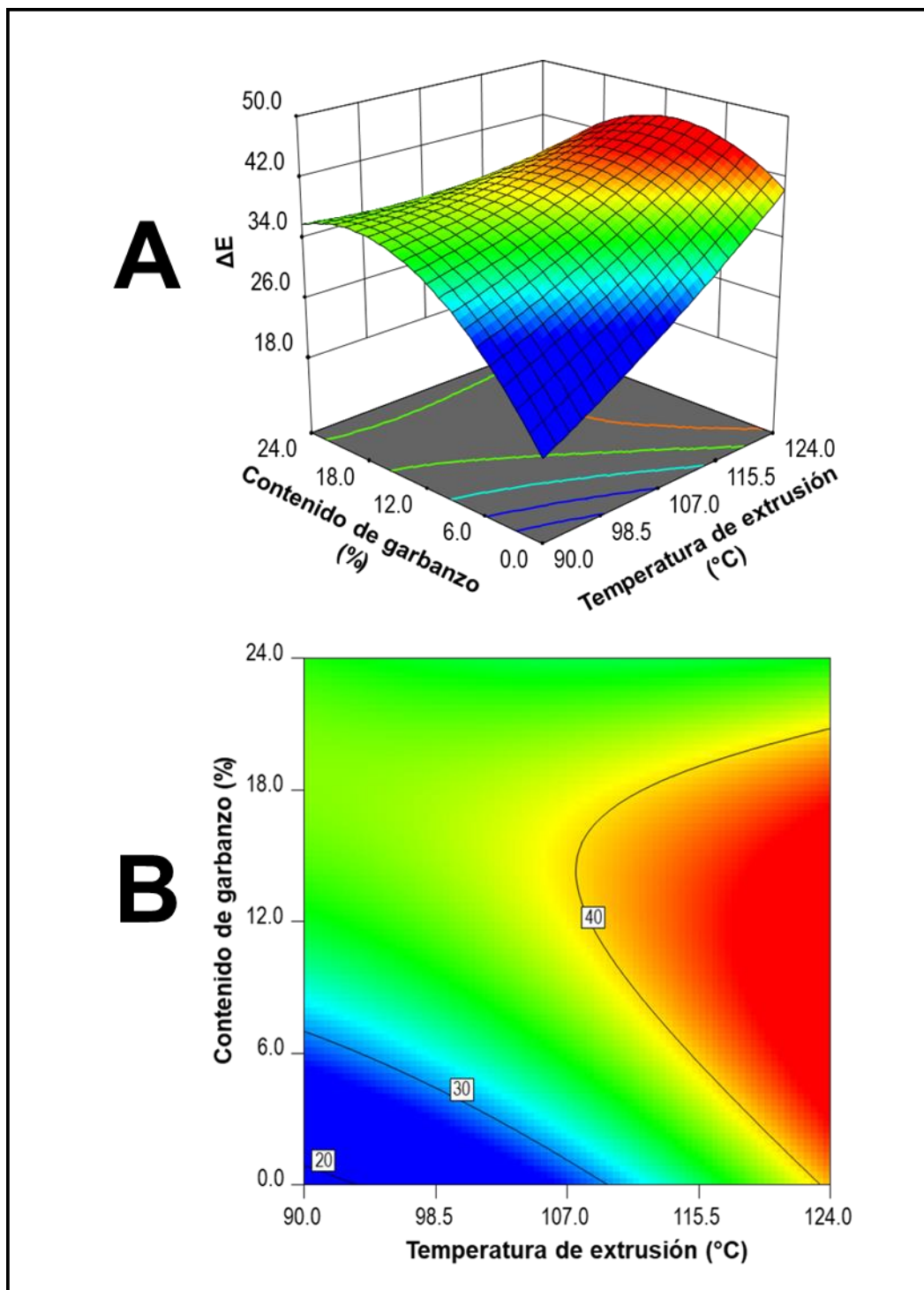


Figura 11. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la diferencia total de color (ΔE) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

Este comportamiento se puede deber a que al incrementar la TE se llevan a cabo reacciones de Maillard y/o de caramelización lo cual genera un mayor cambio en la coloración por la formación de pigmentos oscuros. Asimismo, las altas TE pueden afectar el contenido de pigmentos carotenoides que le dan la coloración amarilla al garbanzo.

Esto concuerda por lo reportado por Wang y col (2017), quienes elaboraron pasta a base de arroz, adicionando salvado de este mismo cereal, donde al incrementar las temperaturas y contenido de salvado, se presentaron los mayores valores de ΔE , lo cual fue atribuido a reacciones de pardeamiento de Maillard durante el proceso de extrusión, y por la presencia de fibra.

2. Pruebas de cocción

El **Cuadro 11** muestra el análisis de varianza para las respuestas del estudio de cocción, como son el tiempo de cocción (TC), aumento de peso (AP), aumento de volumen (AV), y pérdidas de sólidos por cocción (PSC). Todos los parámetros mostraron valores de $R^2_{ajustada} \geq 0.73$, su modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), presentando coeficientes de variación (CV) ≤ 8.70 , y ningún parámetro presentó falta de ajuste ($p > 0.05$).

a. Tiempo de cocción (TC)

Para el análisis de la variable de respuesta tiempo de cocción (TC) se utilizó un modelo cuadrático, el cual fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.73$, CV = 8.70%, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.87$) (**Cuadro 11**).

Cuadro 11. Análisis de varianza de las pruebas de cocción evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas a partir de harina de arroz quebrado y harina de garbanzo extrudido.

Respuesta	R² (ajustada)	CV (%)	Valor F	p de F (Modelo)	Falta de ajuste
TC	0.73	8.70	6.97	0.002	0.87
AP	0.86	2.62	14.05	0.001	0.07
AV	0.89	1.64	17.13	<0.001	0.06
PSPC	0.94	6.63	37.21	<0.001	0.19

CV= Coeficiente de variación; TC= Tiempo de cocción; AP= Aumento de peso; AV= Aumento de volumen y PSC=Pérdidas de sólidos por cocción.

A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$) pero no tuvo efecto en su término cuadrático (TE², b_2 , $p = 0.90$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.14$) pero si mostró efecto en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p < 0.01$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG) no tuvo efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p = 0.44$) ni en su término cuadrático (CG², b_{33} , $p = 0.09$). En el análisis de interacciones, se obtuvo que la interacción TE*VT (b_{12} , $p = 0.12$) no presentó efecto significativo, sin embargo, las interacciones TE*CG (b_{13} , $p = 0.03$) y VT*CG (b_{23} , $p < 0.001$) sí presentaron efecto significativo (**Cuadro 12**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$TC = 8.97 - 1.10*TE + 0.36*VT + 0.18*CG - 0.5*TE*VT - 0.75*TE*CG + 1*VT*CG - 0.02*TE^2 + 0.85*VT^2 + 0.41*CG^2$$

En la **Figura 12** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre el TC de las pastas libres de gluten obtenidas a una VT= 117 rpm. Puede observarse que los los menores (<8 min) valores de TC se encontraron a altas (>115.5 °C) TE y altos (>12 %) CG. En el presente estudio TC presentó una moderada correlación negativa con TE ($r = -0.54$, $p = 0.01$). Este comportamiento puede estar relacionado con las modificaciones en la estructura del almidón por las altas TE, reduciéndose los TC. Esto pudo haber producido un ablandamiento más rápido de la matriz de la pasta debido a la absorción de agua (Marti y col 2010). Este comportamiento es similar al reportado por Rafiq y col (2017), quienes reportaron una correlación negativa entre la TE y el TC en pastas elaboradas a partir de arroz integral.

Cuadro 12. Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las pruebas de cocción evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.

	TC	AP	AV	PSPC
Intercepto	8.97	4.66	55.58	5.80
Lineal				
TE (b ₁)	-1.10 (<0.01)	-3.26 (<0.01)	1.40 (<0.01)	-0.65 (<0.01)
VT (b ₂)	0.36 (0.14)	2.86 (0.04)	-0.11 (0.66)	-0.29 (0.06)
CG (b ₃)	0.18 (0.44)	-0.72 (0.07)	0.79 (0.01)	-0.28 (0.07)
Cuadrático				
TE (b ₁₁)	-0.5 (0.90)	-4.58 (0.03)	-0.052 (<0.01)	0.28 (0.56)
VT (b ₂₂)	-0.75 (<0.01)	-2.31 (<0.01)	-1.49 (<0.01)	-0.70 (<0.01)
CG (b ₃₃)	1.0 (0.09)	3.41 (<0.01)	0.23 (0.54)	0.60 (<0.01)
Interacciones				
TE*VT (b ₁₂)	-0.02 (0.12)	13.09 (0.71)	1.38 (0.87)	-0.082 (0.15)
TE*CG (b ₁₃)	0.85 (0.03)	6.39 (0.03)	2.34 (<0.01)	1.22 (<0.01)
VT*CG (b ₂₁)	0.41 (<0.01)	4.66 (0.25)	-0.15 (0.50)	2.06 (<0.01)

TC= Tiempo de cocción; AP= Aumento de peso; AV= Aumento de volumen; PSC= Pérdida de sólidos por cocción; TE= Temperatura de extrusión; VT= Velocidad de tornillo; CG= Contenido de harina de garbanzo extrudido.

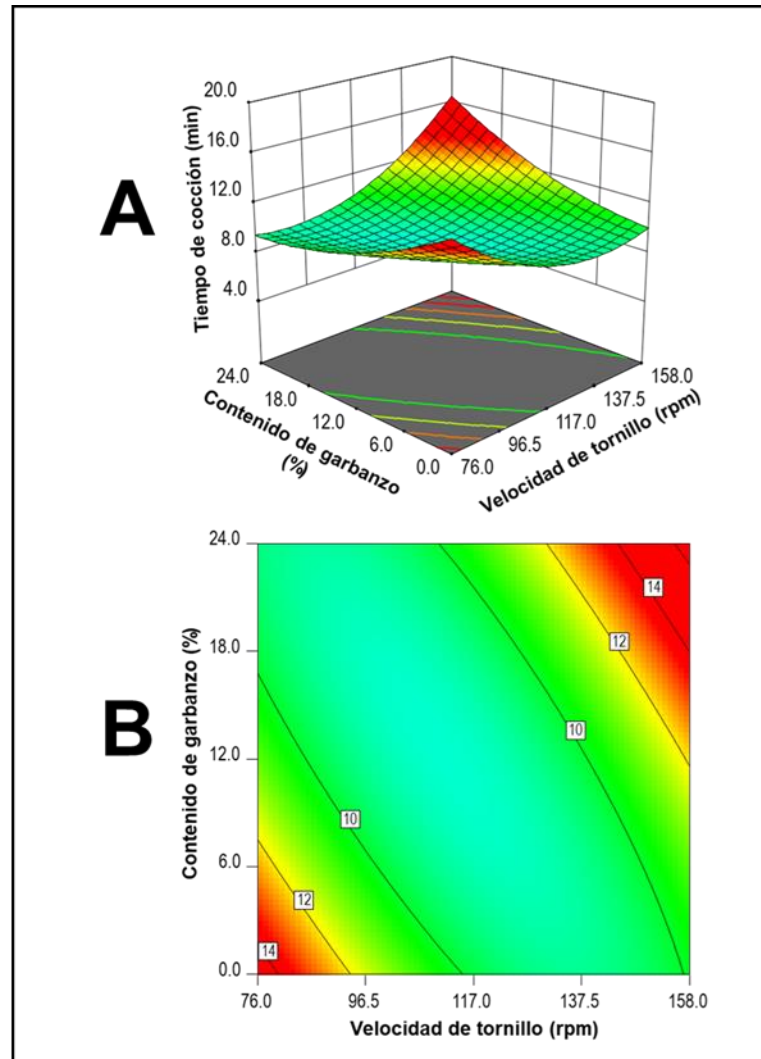
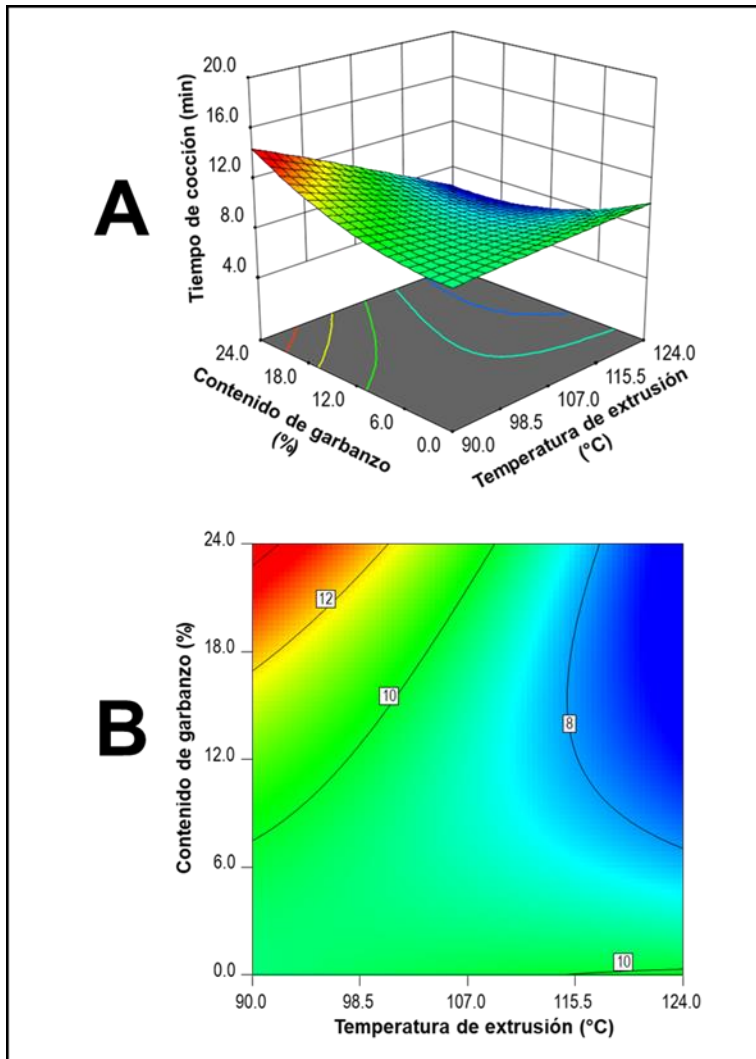


Figura 12. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG)(TE= 107 °C) sobre el tiempo de cocción (TC) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.

Los autores atribuyeron ese comportamiento al rompimiento de las estructuras de los gránulos de almidón del arroz por las altas TE. Asimismo, el comportamiento encontrado en el presente estudio es similar al reportado por Suo y col (2022), quienes observaron en pastas a base de arroz una disminución del TC de 11 a 7 min al aumentar el contenido de harina de garbanzo hasta un 75%. Igualmente, el comportamiento coincide con el reportado por García-Valle y col (2021), quienes produjeron una pasta a base de sémola de trigo con adición de harina de garbanzo, observando que al aumentar la harina de garbanzo de 20% a 100%, el TC disminuyó de 7 a 4.15 min. Sin embargo, el comportamiento encontrado en el presente estudio es diferente al reportado por Detchewa y col (2016), quienes elaboraron una pasta a base de arroz e hidrolizados de proteína de soya, en donde observaron que al añadir menor contenido de proteína soya el TC era menor, lo que atribuyeron a que al añadir soya se obtiene una estructura más densa y menos porosa lo cual dificulta la entrada del agua dentro de la misma, aumentando el TC.

En la **Figura 12** se muestra el efecto de la VT y el CG sobre el TC de las pastas alimenticias libres de gluten a una TE= 107°C. Puede observarse que los menores valores de CT (< 8.5 min) fueron obtenidos a niveles medios-altos (117-144 rpm) de VT en todo el rango de CG. Este comportamiento puede deberse a una mayor gelatinización del almidón de arroz en estas condiciones de extrusión, lo que formó una estructura más compacta, reduciendo el tiempo de hidratación. Wang y col (2012) reportaron un aumento en el TC al aumentar la VT y el contenido de humedad. Estos autores mostraron una correlación positiva de esta respuesta con el porcentaje de almidón gelatinizado en pastas elaboradas a partir de almidón de chícharo. En el

presente estudio, los TC obtenidos estuvieron en un rango de 7 a 13.5 min, siendo estos valores menores a los obtenidos en pastas comerciales, los cuales variaron entre 11 y 12.5 min.

b. Aumento de peso (AP)

Para la variable de respuesta aumento de peso (AP), se utilizó un modelo cuadrático, el cual fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.86$, $CV = 2.62\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.07$) (**Cuadro 11**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la TE y la VT presentaron efecto significativo sobre esta respuesta, tanto en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$; VT, b_2 , $p = 0.04$), como en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p = 0.03$; VT^2 , b_{22} , $p < 0.01$). Asimismo, el factor CG no tuvo efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p = 0.07$), pero sí presentó efecto en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p < 0.01$). En el caso de las interacciones, se encontró que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p = 0.71$) y VT*CG (b_{23} , $p = 0.25$) no presentaron efecto significativo, mientras que la interacción TE*CG (b_{13} , $p = 0.03$) sí presentó efecto significativo. El modelo completo obtenido fue el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{AP} = & 189.36 + 4.66*TE - 3.26*VT + 2.86*CG - 0.72*TE*VT - 4.58*TE*CG - 2.31*VT*CG \\ & + 3.41*TE^2 + 13.09*VT^2 + 6.39*CG^2 \end{aligned}$$

En la **Figura 13** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre el AP de las pastas alimenticias libres de gluten a una VT = 117 rpm. Puede observarse que los menores valores de AP (<190 %) se obtuvieron en un punto mínimo a una TE de 96 °C y CG de 8 %, aproximadamente.

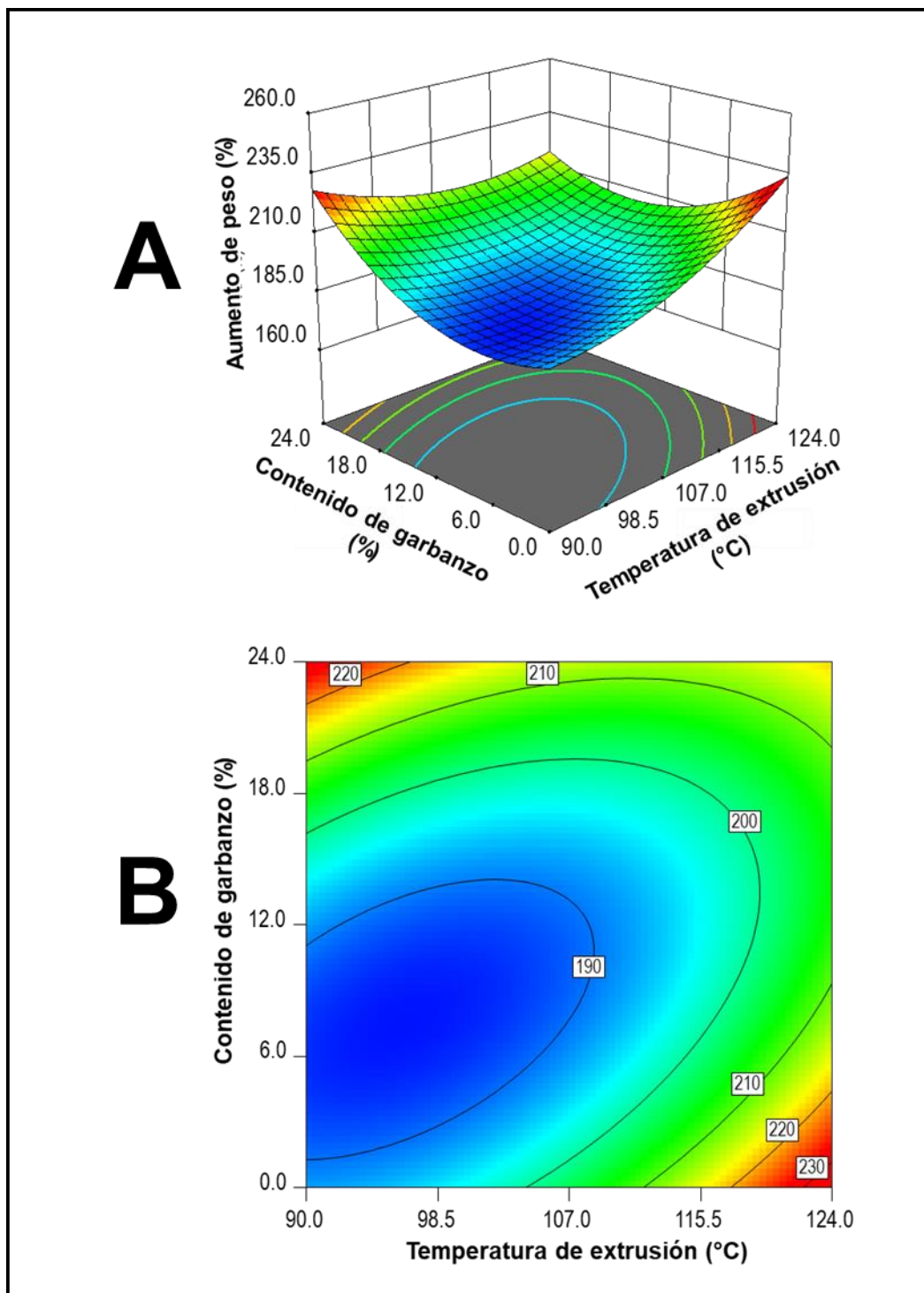


Figura 13. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el aumento de peso (AP) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

Este comportamiento podría deberse a que al incrementar el contenido de CG aumentó el contenido de compuestos tales como las proteínas y fibra dietaria, los cuales pueden ayudar a la absorción de agua. Esto coincide con lo reportado por Wójtowicz y col (2019) en pastas elaboradas con trigo blando y trigo espelta, quienes reportaron que el AP de las pastas estaba altamente correlacionado con el contenido de proteínas en las pastas secas. Asimismo, el incremento de AP al aumentar la TE, puede deberse a que la TE puede favorecer el rompimiento de la estructura de almidón. De acuerdo a Yoenyongbuddhagal y Noomhorn (2002), la absorción de agua depende de la cantidad de almidón dañado por la modificación de la estructura de los gránulos. El comportamiento obtenido en el presente estudio coincide con el reportado por El-Biale y col (2017), quienes reportaron en una pasta a base de maíz y almidón de maíz, que al incrementar la TE de 80 a 115 °C aumentaba gradualmente el AP de 210 a 228 %. El AP varió en todo el diseño de 187.44 a 225.90%, siendo estos datos menores a los obtenidos para pastas comerciales libres de gluten, que fueron de 239.20 ± 4.30 %.

c. Aumento de volumen (AV)

Para el análisis de la variable de respuesta aumento de volumen (AV), se utilizó un modelo cuadrático el cual fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.89$, $CV = 1.64\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.06$) (**Cuadro 11**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.001$) y en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p < 0.01$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT,

b_2 , $p=0.66$) pero sí presentó efecto en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p<0.001$). Para el caso del factor harina de garbanzo extrudido (CG), esta variable mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p=0.01$) pero no tuvo efecto en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p=0.54$). En el análisis de interacciones (**Cuadro 12**) se encontró que la interacción TE*CG (b_{13} , $p<0.01$) presentó efecto significativo, mientras que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p=0.87$) y VT*CG (b_{23} , $p=0.5$) no presentaron efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$AV = 55.58 + 1.40 *TE - 0.11 *VT + 0.79*CG - 0.052*TE*VT - 1.49*TE*CG + 0.23*VT*CG + 1.38*TE^2 + 2.34*VT^2 - 0.15*CG^2$$

En la **Figura 14** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre el AV de las pastas alimenticias libres de gluten a una VT= 117 rpm. Puede observarse que los menores valores de AV (<54 %) se obtuvieron a niveles bajos (<6 %) de CG y bajas (<107 °C) TE. Mientras que los mayores (>60 %) valores de AV se obtuvieron en dos zonas, la primera a altos (>18%) CG y bajas (<98.5 °C) TE, y la segunda a bajos (<12 %) CG y altas (>120 °C) TE. En el presente estudio AV presentó una alta correlación positiva con AP ($r=0.79$, $p<0.001$). Este comportamiento es similar al observado en AP, el cual podría deberse a que al incrementar el contenido de HG se incorporan compuestos tales como la fibra dietaria los cuales ayudan a incrementar la absorción de agua, mientras que en al disminuir la TE podría haberse presentado mayor tiempo de residencia de los materiales, provocando mayor degradación del almidón, e incrementando AV. Por otro lado, en la segunda zona los altos AV obtenidos a bajos (<12 %) CG y altas (>120 °C) TE pudieron deberse a que a bajos CG se presentó menor contenido de fibra dietaria y mayor contenido de almidón aportado por el arroz,

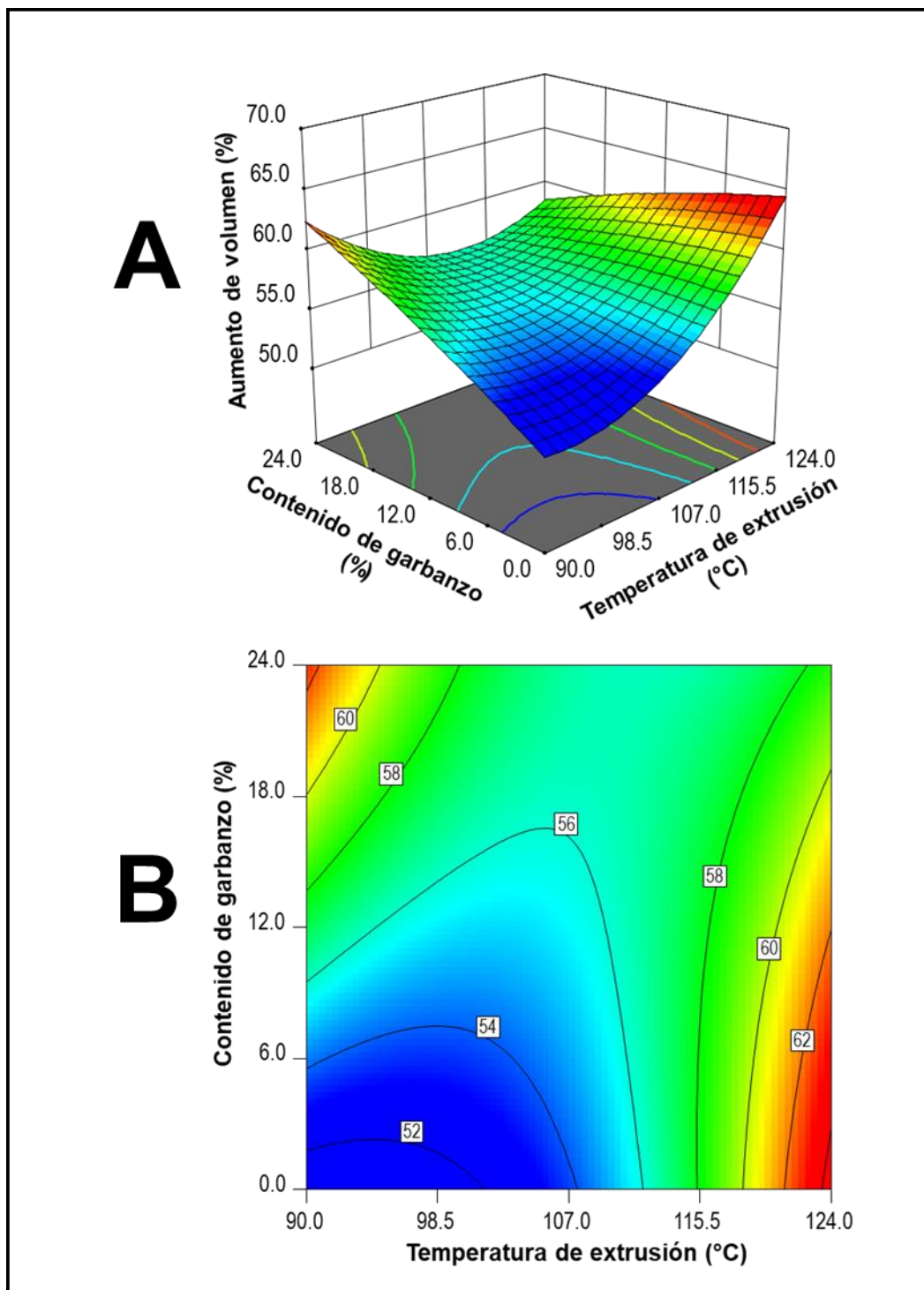


Figura 14. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el aumento de volumen (AV) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

lo que favoreció la gelatinización, la cual se pudo haber incrementado a altas TE. Esto coincide con lo reportado por Da Silva y col (2016), quienes reportaron que en la elaboración de pastas con materias primas no convencionales, generalmente un mayor contenido de fibra y/o proteínas, puede conducir a una disminución del aumento de peso y del volumen de las pastas. En el presente estudio el AV varió en todo el diseño de 53.1 a 63%, siendo estos datos similares a los reportados en pastas comerciales.

d. Pérdidas de sólidos por cocción (PSC)

La pérdida de sólidos durante el proceso de cocción de la pasta es indeseable, ya que se genera por la solubilización de compuestos como almidones, proteínas y minerales que pasan al agua de cocción, lo que provoca que las pastas pierdan su forma (Granito y col 2014).

Para el análisis de la variable de respuesta pérdidas de sólidos por cocción (PSC), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p < 0.001$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.94$, $CV = 6.63\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.19$) (**Cuadro 11**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.001$) pero no mostró efecto en su término cuadrático (TE², b_2 , $p = 0.53$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.06$) pero sí presentó efecto significativo en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p < 0.01$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este no tuvo efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p = 0.07$), pero sí mostró efecto en su término cuadrático (CG², b_{33} , $p < 0.01$). En el caso de las

interacciones, la interacción TE*VT (b_{12} , $p=0.15$) no presentó efecto significativo, mientras que las interacciones TE*CG (b_{13} , $p<0.001$) y VT*CG (b_{23} , $p<0.01$) sí presentaron efecto significativo (**Cuadro 12**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{PSC} = 5.80 - 0.65*TE - 0.29*VT - 0.28*CG + 0.28*TE*VT - 0.70*TE*CG + 0.60*VT*CG - 0.082*TE^2 + 1.22*VT^2 + 2.06*CG^2$$

En la **Figura 15** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre los valores de PSC de las pastas alimenticias libres de gluten a una VT=117 rpm. Puede observarse que los mayores valores de PSC (>12 %) se obtuvieron en dos zonas principales, la primera a valores altos (>19 %) de CG y bajos (<107 °C) de TE, y la segunda a bajos (<2 %) CG en todo el rango de TE. Asimismo, los menores valores (<6 %) de PSC se presentaron a niveles medios (8-18 %) de CG y altos (>107 °C) de TE. Este comportamiento se puede atribuir a que altas TE causaron una disminución en la viscosidad del almidón fundido, reduciendo el tiempo de residencia de los materiales dentro del extrusor, lo que redujo la fricción o el cizallamiento en el equipo y la degradación molecular, reduciendo las PSC (Wang y col 2012). Esto coincide con el comportamiento observado por Jalgaonkar y col (2019), quienes observaron en pastas producidas a partir de sémola de trigo y mijo perla, que al aumentar la TE se produjo una disminución de las PSC de 10 a 7%. En el presente estudio, las PSC variaron en todo el diseño de 5.02 a 11.79 %, siendo estos datos similares a los obtenidos para pastas comerciales en donde se obtuvieron valores de 4.71 a 13.21 %.

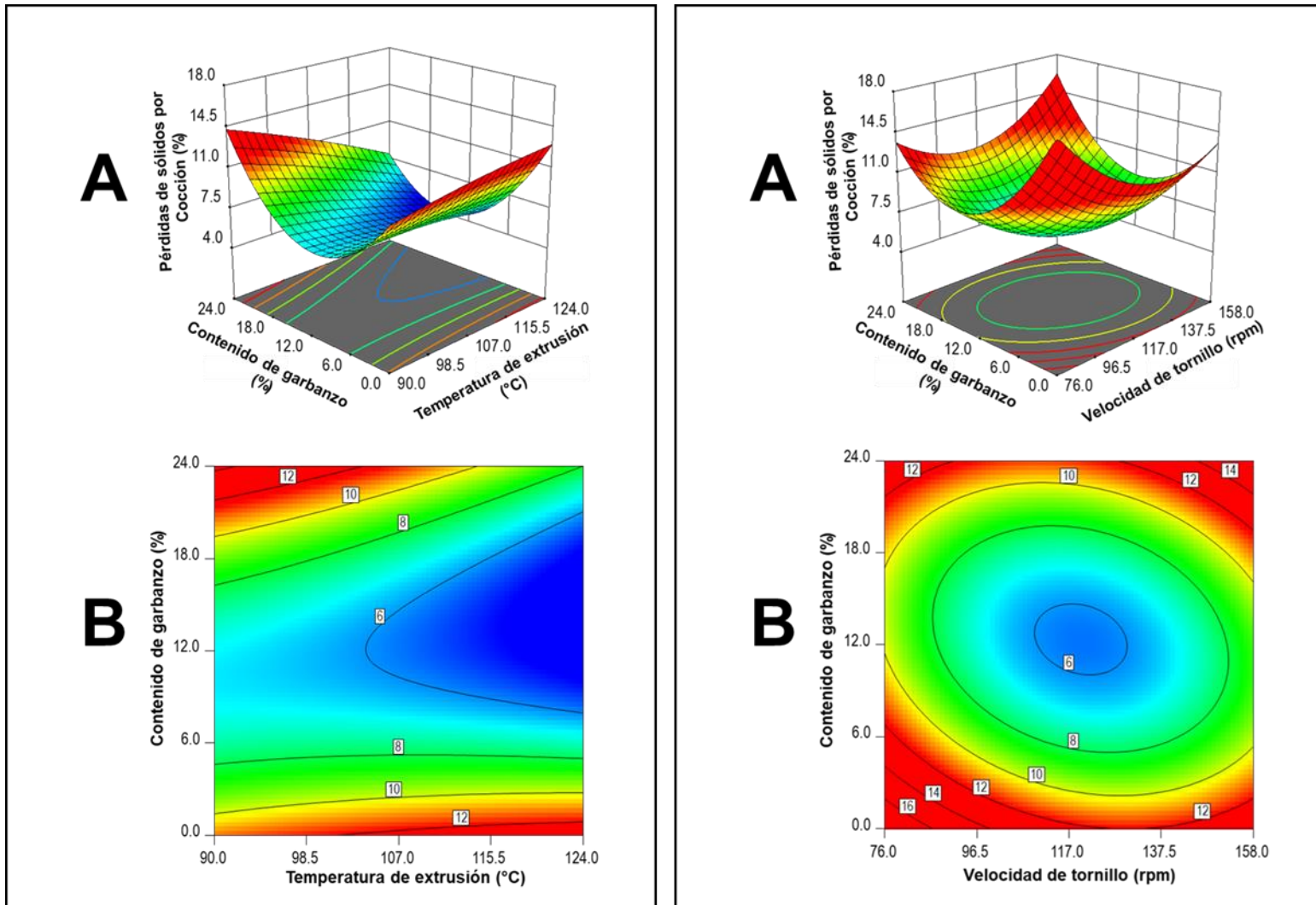


Figura 15. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre la pérdida de sólidos por cocción (PSC) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.

En la **Figura 15** se muestra el efecto de la VT y el CG sobre las PSC de las pastas alimenticias libres de gluten, a una TE= 107°C. Puede observarse que se presentó un comportamiento tipo mínimo, presentando los menores valores (< 7%) de PSC en valores intermedios (96-144 rpm) de VT e intermedios (8-18%) de CG. Fuera de este punto, al moverse a cualquier extremo del diseño experimental los valores de PSC se incrementaron. Este comportamiento podría estar relacionado con la disminución en la proporción de almidón en las pastas cuando se incrementaron los valores de CG debido a los elevados niveles de proteína y fibra que presenta esta leguminosa. Este comportamiento podría haber provocado una fuerte interacción proteínas-agua, reduciendo así el coeficiente de difusión de la amilosa en el agua de cocción. Otros factores que podrían favorecer la disminución de PSC son las interacciones proteína-almidón y el mantenimiento de la integridad estructural de la pasta (Padalino y col 2015).

Este comportamiento es similar al reportado por Suo y col (2022), quienes mencionaron que la PSC se redujeron significativamente al aumentar el contenido de garbanzo de 0 a 75% en una pasta a base de arroz. Un valor de pérdidas de sólidos por cocción por debajo del 12% se considera aceptable para una pasta de buena calidad (Hoseney, 1999). De igual manera, Udachan y Sahoo (2017) elaboraron una pasta a base de arroz quebrado y harina de soya desgrasada donde observaron que, conforme se sustituyó el arroz con la harina de soya, las PSC aumentaron de 6.23 a un 12.51%, atribuyendo esto a la alteración de la matriz de almidón, permitiendo la filtración de este durante el proceso de cocción.

3. Análisis fitoquímicos, funcionales y biológicos

El **Cuadro 13** muestra el análisis de varianza para las variables de respuesta carotenoides totales (CT), compuestos fenólicos totales (CFT), actividad antioxidante ABTS total (ABTST), actividad antioxidante DPPH total (DPPHT), Todos los parámetros evaluados mostraron un modelo de regresión significativo (p de $F < 0.01$), valores de $R^2_{ajustada} \geq 0.74$, coeficientes de variación (CV) de 3.67 a 10.60, y no presentaron falta de ajuste ($p > 0.05$).

a. Carotenoides totales (CT)

Para el análisis de la variable de respuesta carotenoides totales (CT) se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.98$, $CV = 7.59\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.11$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) no presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p = 0.11$), pero sí mostró efecto significativo en su término cuadrático (TE², b_2 , $p < 0.01$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p < 0.01$). Para el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este presentó efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (CG², b_{33} , $p < 0.01$). En el análisis de las interacciones, se obtuvo que la interacción VT*CG (b_{23} , $p < 0.01$) presentó efecto significativo (**Cuadro 14**), mientras que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p = 0.94$) y TE*CG (b_{13} , $p = 0.73$) no mostraron efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

Cuadro 13. Análisis de varianza de las respuestas fitoquímicas, funcionales y biológicas de las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de garbanzo extrudido.

Respuesta	R² (ajustada)	CV (%)	Valor F	p de F (Modelo)	Falta de ajuste
CT	0.98	7.59	157.18	<0.001	0.11
CFT	0.87	5.60	23.50	<0.001	0.07
ABTST	0.91	3.67	24.76	<0.001	0.05
DPPHT	0.75	8.36	6.25	0.004	0.05
DeoxiLib	0.79	5.68	9.42	0.008	0.13
DeoxiLig	0.94	4.71	35.90	<0.001	0.09
LDLLib	0.80	5.06	9.99	0.0006	0.17
LDLLig	0.78	5.42	8.51	0.0012	0.20

CV= Coeficiente de variación; CT= Contenido de carotenoides totales; CFT= Compuestos fenólicos totales; CFLib= Compuestos fenólicos de extractos libres; CFLig= Compuestos fenólicos de extractos ligados; ABTS T= Actividad antioxidante por el método ABTS totales; DPPHT= Actividad antioxidante por el método DPPH totales; DeoxiLib= Inhibición del radical hidroxilo de extractos libres; DeoxiLig= Inhibición del radical hidroxilo de extractos ligados; LDLLib= Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos libres y LDLLig= Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos ligados.

Cuadro 14. Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las variables de respuesta fitoquímicas y funcionales evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.

	CT	CFT	CFLib	CFLig	ABTST	DPPHT
Intercepto	38.69	1.47	0.41	0.98	6.37	8.19
Lineal						
TE (b ₁)	-1.94 (0.11)	0.13 (<0.01)	0.05 (<0.01)	0.082 (<0.01)	0.50 (<0.01)	0.42 (0.03)
VT (b ₂)	-15.06 (<0.01)	-0.04 (0.09)	-0.01 (0.32)	-0.02 (0.08)	0.06 (0.39)	0.17 (0.35)
CG (b ₃)	27.03 (<0.01)	0.16 (<0.01)	0.08 (<0.01)	0.07 (<0.01)	0.53 (<0.01)	0.78 (<0.01)
Cuadrático						
TE (b ₁₁)	-0.11 (<0.01)	--	0.014 (<0.01)	--	0.41 (<0.01)	-0.47 (0.60)
VT (b ₂₂)	0.52 (<0.01)	--	0.025 (0.29)	--	0.12 (<0.01)	0.82 (0.63)
CG (b ₃₃)	-21.43 (<0.01)	--	-0.005 (0.20)	--	0.081 (0.62)	0.06 (<0.01)
Interacciones						
TE*VT (b ₁₂)	-6.58 (0.94)	0.12 (<0.01)	0.06 (0.43)	0.11 (<0.01)	0.51 (<0.01)	0.09 (0.06)
TE*CG (b ₁₃)	20.05 (0.73)	-0.15 (<0.01)	0.015 (0.19)	-0.17 (<0.01)	0.37 (0.21)	0.08 (<0.01)
VT*CG (b ₂₃)	11.11 (<0.01)	0.05 (0.10)	0.018 (0.74)	0.05 (<0.01)	-0.03 (0.38)	-0.61 (0.80)

CT= Contenido de carotenoides totales; CFT= Compuestos fenólicos totales; CFLib= Compuestos fenólicos libres; CFLig= Compuestos fenólicos ligados; ABTS T= Actividad antioxidante por el método ABTS totales; DPPHT= Actividad antioxidante por el método DPPH totales; TE= Temperatura de extrusión; VT= Velocidad de tornillo; CG= Contenido de harina de garbanzo extrudido.

$$\text{CT} = 38.69 - 1.94 \cdot \text{TE} - 15.06 \cdot \text{VT} + 27.03 \cdot \text{CG} - 0.11 \cdot \text{TE} \cdot \text{VT} + 0.52 \cdot \text{TE} \cdot \text{CG} - 21.43 \cdot \text{VT} \cdot \text{CG} - 6.58 \cdot \text{TE}^2 + 20.05 \cdot \text{VT}^2 + 11.11 \cdot \text{CG}^2$$

En la **Figura 16** se muestra el efecto de la VT y el CG sobre el contenido de CT de las pastas alimenticias libres de gluten a una TE= 107°C. Puede observarse que a bajas VT, conforme se incrementó el CG, el CT aumentó, mientras que a altas VT conforme se incrementó el CG no existió un incremento importante en los valores de CT. Los mayores (>1 µg/g b.s) valores de CT se presentaron a niveles altos (>12%) de CG y bajos (<117 rpm) de VT. Este comportamiento pudo deberse al importante contenido de CT presentado por la harina de garbanzo extrudido, que fue la materia prima que mostró el mayor contenido de CT, por lo cual, al incrementarse su concentración en las pastas extrudidas, aumentó el contenido de CT. Asimismo, este comportamiento puede atribuirse a que en bajas VT se presentó menor daño mecánico, permitiendo una mayor retención de los carotenoides. Esto coincide con lo reportado por Ortak y col (2017), quienes mencionaron que, durante el proceso de extrusión de grits de maíz y zanahoria, debido a la alta velocidad del tornillo y temperatura, se formó tensión mecánica y térmica durante la cocción. El efecto combinado de estas dos tensiones causó una gran pérdida de carotenoides como resultado de su estructura insaturada.

En el presente estudio, el contenido de CT presentó una correlación positiva con el factor CG ($r= 0.61$, $p<0.001$), lo cual puede deberse al importante aporte de CT que presentó la harina de garbanzo. Asimismo, el contenido de CT presentó una correlación positiva con el AP ($r=0.62$, $p<0.001$).

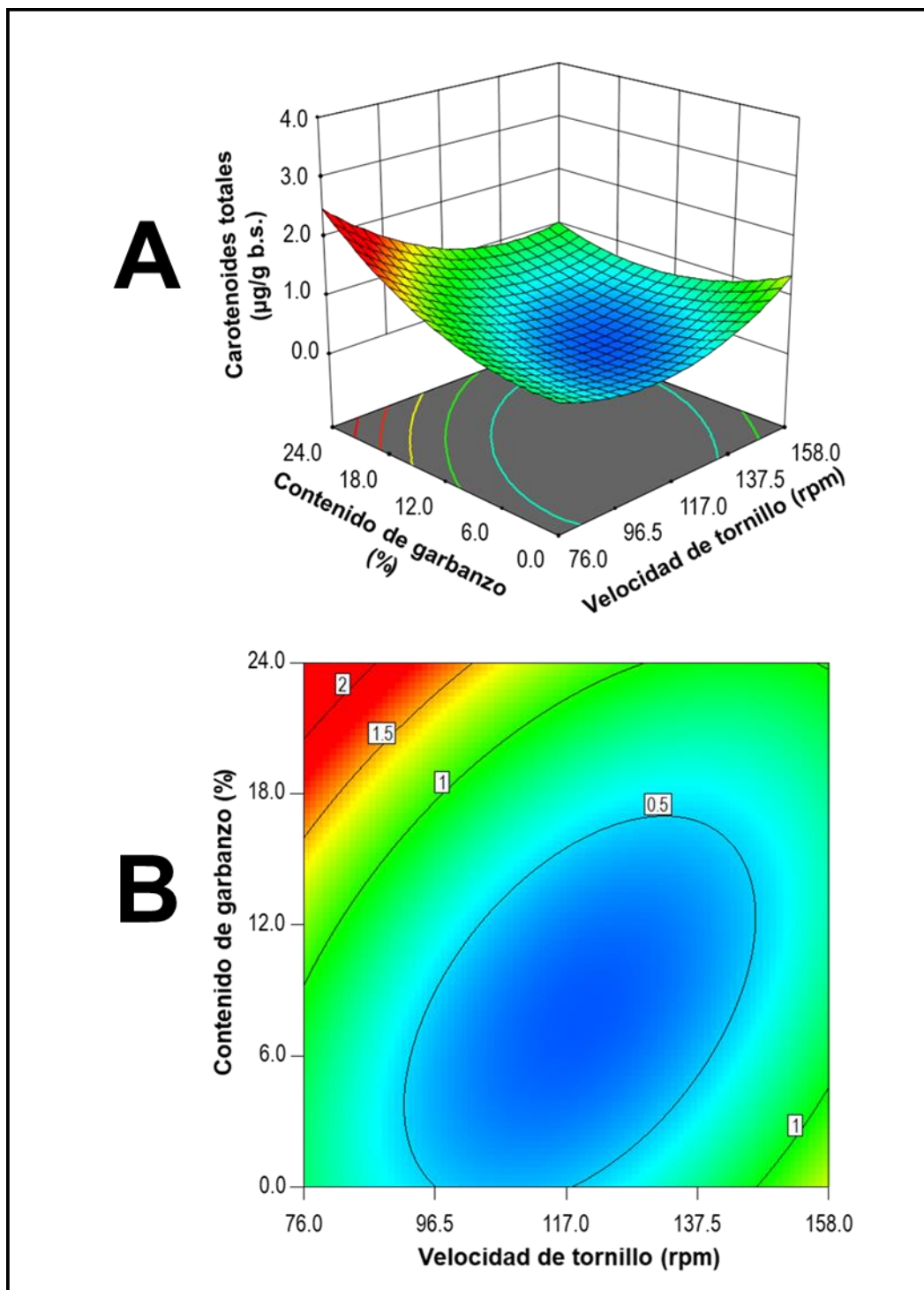


Figura 16. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el contenido de carotenoides totales (CT) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). A, superficies y B, contornos.

b. Compuestos fenólicos totales (CFT)

Los polifenoles son el grupo principal de no nutrientes biológicamente activos presentes en los alimentos. Estos compuestos muestran efectos fisiológicos que pueden ayudar a prevenir enfermedades crónicas (Koch y col 2019). Además, son los principales antioxidantes de la dieta, y su ingesta es diez veces superior a la de la vitamina C, y cien veces superior a la de la vitamina E o los carotenoides (Quiñones y col 2012). En las materias primas utilizadas para la producción de las pastas libres de gluten mediante el proceso de extrusión, se obtuvo que la harina de arroz quebrado (HAQ) presentó un contenido de compuestos fenólicos de 1.03 ± 0.33 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/g de extracto seco. Asimismo, la harina de garbanzo extrudido (HG) presentó un contenido de compuestos fenólicos de 8.68 ± 0.25 mg EAG/g de extracto seco.

Asimismo, en el análisis de la variable de respuesta CFT en las pastas alimenticias, se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.87$, $CV = 5.60\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.07$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos, se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.001$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.09$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este factor mostró efecto significativo sobre el contenido de CFT en su término lineal (CG, b_3 , $p < 0.01$). Asimismo, ningún término cuadrático de los tres factores de estudio (TE, VT, CG) fue utilizado en los modelos matemáticos. En el caso de las interacciones, TE*VT (b_{12} , $p < 0.01$) y TE*CG

(b_{13} , $p < 0.01$) presentaron efecto significativo, mientras que la interacción $VT * CG$ (b_{23} , $p = 0.10$) no mostró efecto significativo (**Cuadro 14**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$CFT = 1.47 + 0.13 * TE - 0.04 * VT + 0.16 * CG + 0.12 * TE * VT - 0.15 * TE * CG + 0.05 * VT * CG$$

En la **Figura 17** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre el contenido de CFT de las pastas alimenticias libres de gluten a una $VT = 117$ rpm. Puede observarse que a bajas TE conforme se incrementó el CG, el contenido de CFT aumentó de manera importante. Asimismo, a altas TE conforme aumentó el CG los CFT presentaron una ligera disminución. Los mayores (> 1.5 mg EAG/g b.s.) valores de CFT se presentaron en dos zonas: la primera, a niveles altos (> 18 %) de CG y bajas (< 107 °C) TE. Este comportamiento puede deberse al importante contenido de CFT encontrados en la HG, que fue mayor al encontrado en la HAQ utilizada en el presente estudio. Asimismo, en la segunda zona de altos valores de CFT, a niveles bajos (< 6 %) de CG y altas (> 120 °C), este comportamiento podría deberse a la liberación de compuestos fenólicos ligados tanto de la HG como de la HAQ, como resultado del incremento de la TE. Herrera-Cázares y col (2021) reportaron que el proceso de extrusión puede liberar compuestos fenólicos debido al efecto combinado de la TE y estrés cortante, lo que permite su potencial solubilización y bioaccesibilidad diferencial durante el proceso de digestión. La extrusión puede ser una tecnología para preservar la capacidad antioxidante de los alimentos.

Asimismo, el comportamiento del presente estudio difiere al reportado por Sun y col (2019), quienes reportaron una disminución en el contenido de CFT a altas TE en pastas elaboradas con trigo sarraceno.

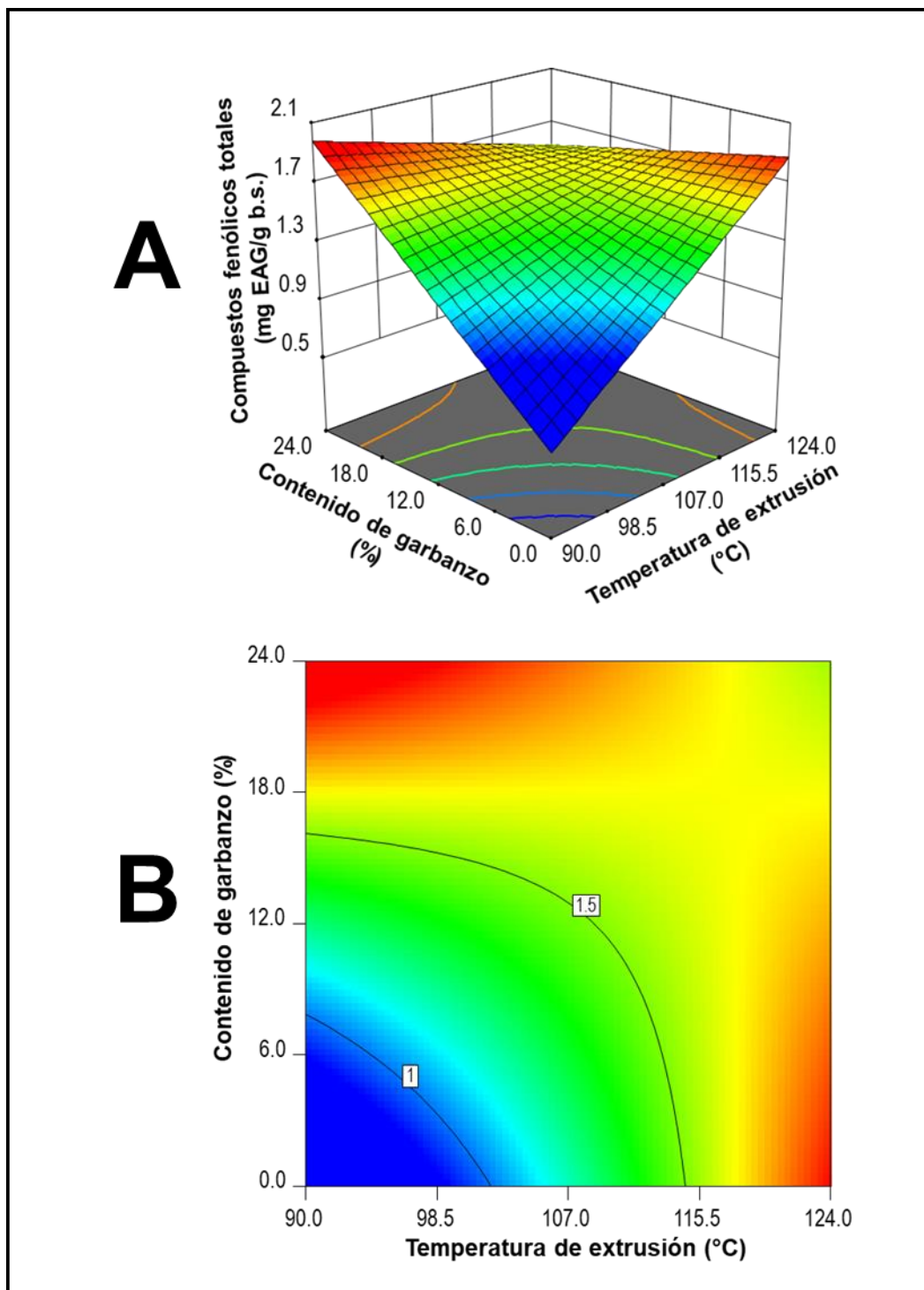


Figura 17. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

c. Actividad antioxidante ABTS total (ABTST)

Para el análisis de la variable de respuesta actividad antioxidante ABTS total (ABTST) se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.91$, $CV = 3.67\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.06$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p < 0.01$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.39$), pero sí presentó efecto en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p < 0.01$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este tuvo efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p < 0.01$) pero no tuvo efecto significativo en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p = 0.62$). En el caso de las interacciones, TE*VT (b_{12} , $p < 0.01$) presentó efecto significativo, mientras que las interacciones TE*CG (b_{13} , $p = 0.21$) y VT*CG (b_{23} , $p = 0.38$) no tuvieron efecto significativo (**Cuadro 14**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{ABTST} = & 6.37 + 0.50*TE + 0.06*VT + 0.53*CG + 0.41*TE*VT + 0.12*TE*CG \\ & + 0.081*VT*CG + 0.51*TE^2 + 0.37*VT^2 - 0.03*CG^2 \end{aligned}$$

En la **Figura 18** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre la actividad antioxidante ABTST de las pastas alimenticias libres de gluten a una $VT = 117$ rpm. Puede observarse que los mayores ($> 8 \mu\text{mol ET/g b.s.}$) valores de ABTST se obtuvieron a niveles altos ($> 12\%$) de CG y altas ($> 115^\circ\text{C}$) TE. Este comportamiento podría deberse al importante contenido de compuestos fenólicos presentes en la materia prima harina de garbanzo. De igual manera, las altas TE pudieron favorecer la

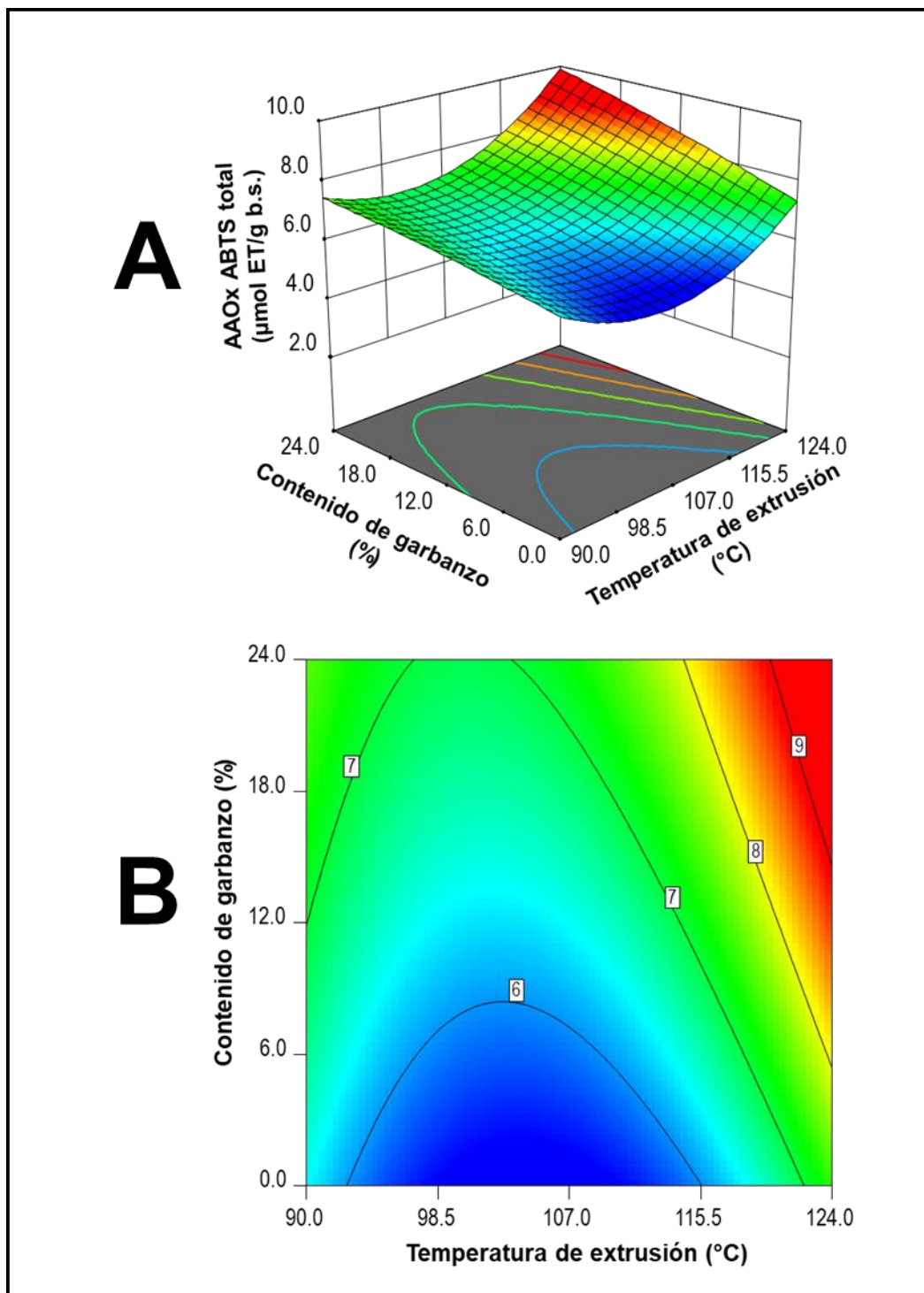


Figura 18. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la actividad antioxidante ABTS total (ABTST) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

liberación de compuestos fenólicos, incrementando la actividad antioxidante. Martínez-Valverde y col (2000) reportaron que tanto en cereales como en leguminosas los principales compuestos fenólicos son los ácidos fenólicos y los flavonoides. Diversos autores han reportado que una de las principales propiedades biológicas de estos compuestos es su alta actividad antioxidante, que se debe a su estructura química, que contiene un núcleo fenólico y una cadena lateral insaturada que les permite formar un radical fenoxilo estabilizado por resonancia, el cual tiene actividad como agente secuestrador de radicales libres (Adelakun y col 2012). En el presente estudio, los valores de ABTST variaron de 5.5 a 8.9 $\mu\text{mol ET/g b.s.}$, presentando una moderada correlación positiva con el factor CG ($r= 0.49$, $p=0.02$), lo cual podría deberse al importante aporte de compuestos fitoquímicos de la HG.

d. Actividad antioxidante DPPH total (DPPHT)

Para el análisis de la variable de respuesta actividad antioxidante DPPH total (DPPHT) fue utilizado un modelo cuadrático significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{\text{ajustada}} = 0.75$, $CV = 8.36\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.06$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p=0.03$), pero no presentó efecto significativo en su término cuadrático (TE², b_2 , $p=0.060$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p=0.35$) ni en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p=0.63$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (CG², b_{33} , $p < 0.01$).

En el análisis de interacciones, se obtuvo que solamente la interacción TE*CG (b_{13} , $p < 0.01$) presentó efecto significativo (**Cuadro 14**), mientras que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p = 0.06$) y VT*CG (b_{23} , $p = 0.80$) no tuvieron efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{DPPHT} = 8.19 + 0.42*TE + 0.17*VT + 0.78*CG - 0.47*TE*VT + 0.82*TE*CG \\ + 0.06*VT*CG + 0.09*TE^2 + 0.08*VT^2 - 0.61*CG^2$$

En la **Figura 19** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre los valores de DPPHT de las pastas alimenticias libres de gluten a una VT= 117 rpm. Puede observarse que a bajo CG conforme se incrementó la TE, la actividad antioxidante DPPHT aumentó, mientras que a alto CG conforme se incrementó la TE, aumentaron los valores de DPPHT. Los mayores valores de DPPHT ($>10 \mu\text{g ET/g b.s.}$) fueron presentados a altos niveles ($>12 \%$) de CG y altas ($>115.5 \text{ }^\circ\text{C}$) TE. Este comportamiento es similar a lo encontrado para la actividad antioxidante ABTST, en donde se observó que a altos HG se presentaron elevados valores de actividad antioxidante, atribuidos al alto contenido de compuestos fenólicos presentados por la harina de garbanzo. Asimismo, las altas TE pudieron favorecer la liberación de compuestos fenólicos ligados a las paredes celulares de la HG. Rico y col (2021) elaboraron una pasta a base de arroz y lenteja (50/50 %) y reportaron conforme aumentó la TE de 110 a 130 $^\circ\text{C}$ se incrementó gradualmente la actividad antioxidante DPPH de 324.25 ± 23.80 a $959.12 \pm 71.57 \mu\text{mol ET/ 100g b.s.}$ Este comportamiento lo atribuyeron a la modificación de la estructura los compuestos fenólicos inducida por la ruptura celular a altas TE, produciendo una mayor porosidad de la pared celular y una mejora en la difusión del disolvente durante la extracción, mejorando la disponibilidad de estos compuestos.

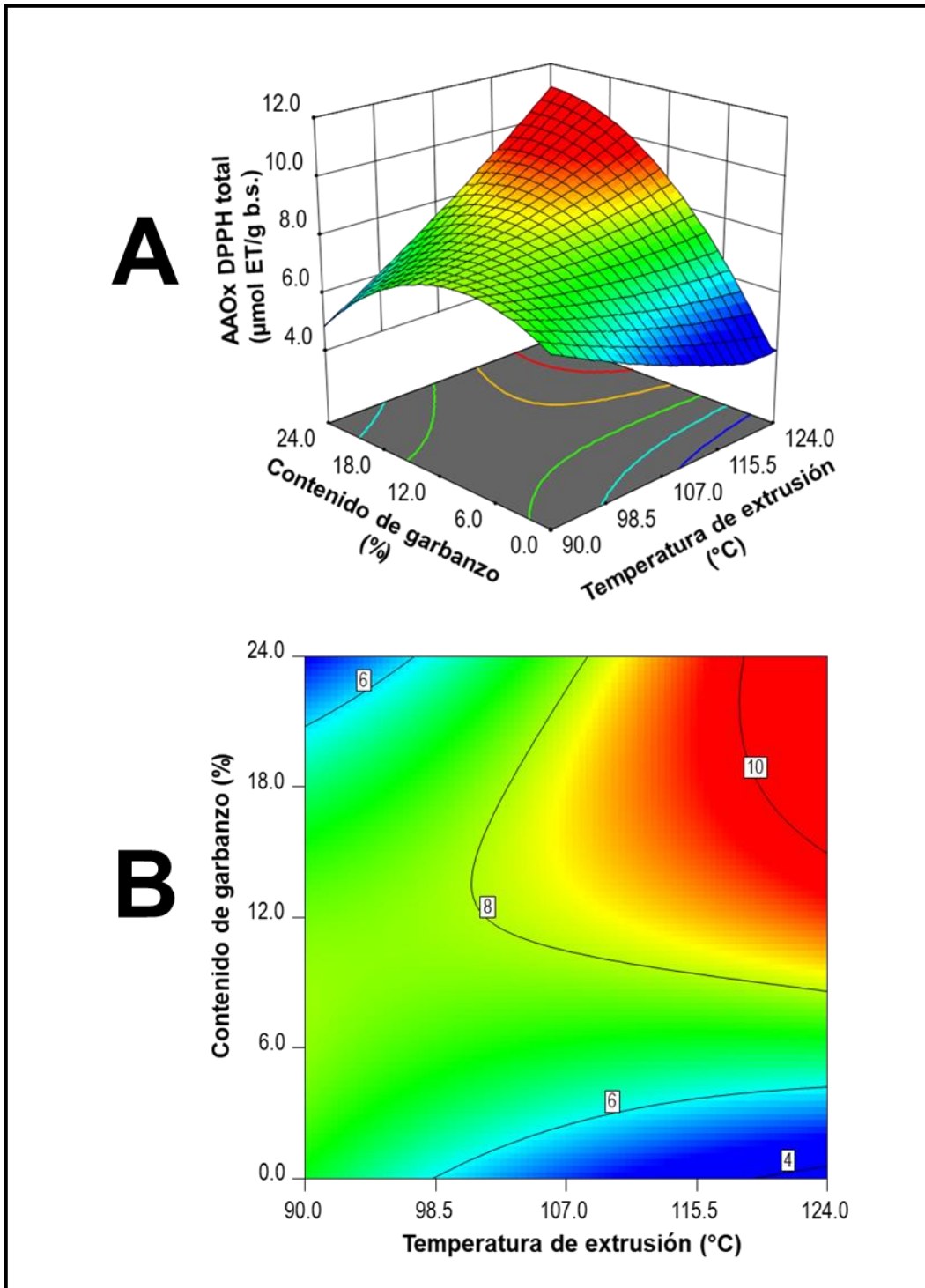


Figura 19. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la actividad antioxidante DPPH total (DPPHT) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

e. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo libres (DeoxiLib)

Para el análisis de la variable de respuesta inhibición de oxidación por el radical hidroxilo del extracto libre (DeoxiLib), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.79$, $CV = 5.68\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.13$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$), pero no presentó efecto significativo en su término cuadrático (TE², b_2 , $p = 0.10$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.11$), pero sí mostró efecto en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p = 0.02$). En el caso del factor harina de garbanzo extrudido (CG), este no tuvo efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p = 0.43$), pero sí mostró efecto en su término cuadrático (CG², b_{33} , $p < 0.01$). En el análisis de interacciones, se obtuvo que las tres interacciones TE*VT (b_{12} , $p < 0.001$), TE*CG (b_3 , $p = 0.03$), y VT*CG (b_{23} , $p = 0.02$) presentaron efecto significativo (**Cuadro 15**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{DeoxiLib} = 18.04 + 1.14*TE + 0.47*VT + 0.22*CG + 1.41*TE*VT + 0.91*TE*CG \\ + 0.92*VT*CG - 0.47*TE^2 - 0.73*VT^2 + 1.26*CG^2$$

En la **Figura 20** se muestra el efecto de la TE y CG sobre la actividad antioxidante DeoxiLib de las pastas alimenticias libres de gluten, a una VT = 117 rpm. Puede observarse que los mayores valores de la inhibición de la oxidación por el radical hidroxilo de extractos libres (DeoxiLib, >22 %) se presentaron a niveles altos (>18 %) de CG y altas (>115.5 °C) TE.

Cuadro 15. Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las variables de respuesta biológicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.

	DeoxiLib	DeoxiLig	LDLLib	LDLLig
Intercepto	18.04	22.30	75.56	57.65
Lineal				
TE (b ₁)	1.14 (<0.001)	0.83 (0.03)	6.38 (<0.001)	-0.51 (0.61)
VT (b ₂)	0.47 (0.11)	1.22 (<0.001)	0.06 (0.94)	-0.17 (0.86)
CG (b ₃)	0.22 (0.43)	4.75 (<0.001)	1.44 (0.16)	3.85 (<0.001)
Cuadrático				
TE (b ₁₁)	1.41 (0.10)	0.55 (<0.001)	1.06 (<0.001)	-1.72 (<0.001)
VT (b ₂₂)	0.91 (0.02)	0.98 (<0.001)	1.60 (0.46)	-1.65 (<0.001)
CG (b ₃₃)	0.92 (<0.001)	0.68 (<0.001)	-2.46 (0.31)	2.69 (<0.001)
Interacciones				
TE*VT (b ₁₂)	-0.47 (<0.001)	2.58 (0.23)	-5.74 (0.41)	4.87 (0.20)
TE*CG (b ₁₃)	-0.73 (0.03)	1.40 (0.04)	-0.70 (0.23)	4.44 (0.22)
VT*CG (b ₂₁)	1.26 (0.02)	1.41 (0.14)	-0.99 (0.05)	3.60 (0.05)

DeoxiLib= Inhibición del radical hidroxilo de extractos libres; DeoxiLig= Inhibición del radical hidroxilo de extractos ligados; LDLLib= Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos libres y LDLLig= Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos ligados; TE= Temperatura de extrusión; VT= Velocidad de tornillo; CG= Contenido de harina de garbanzo extrudido.

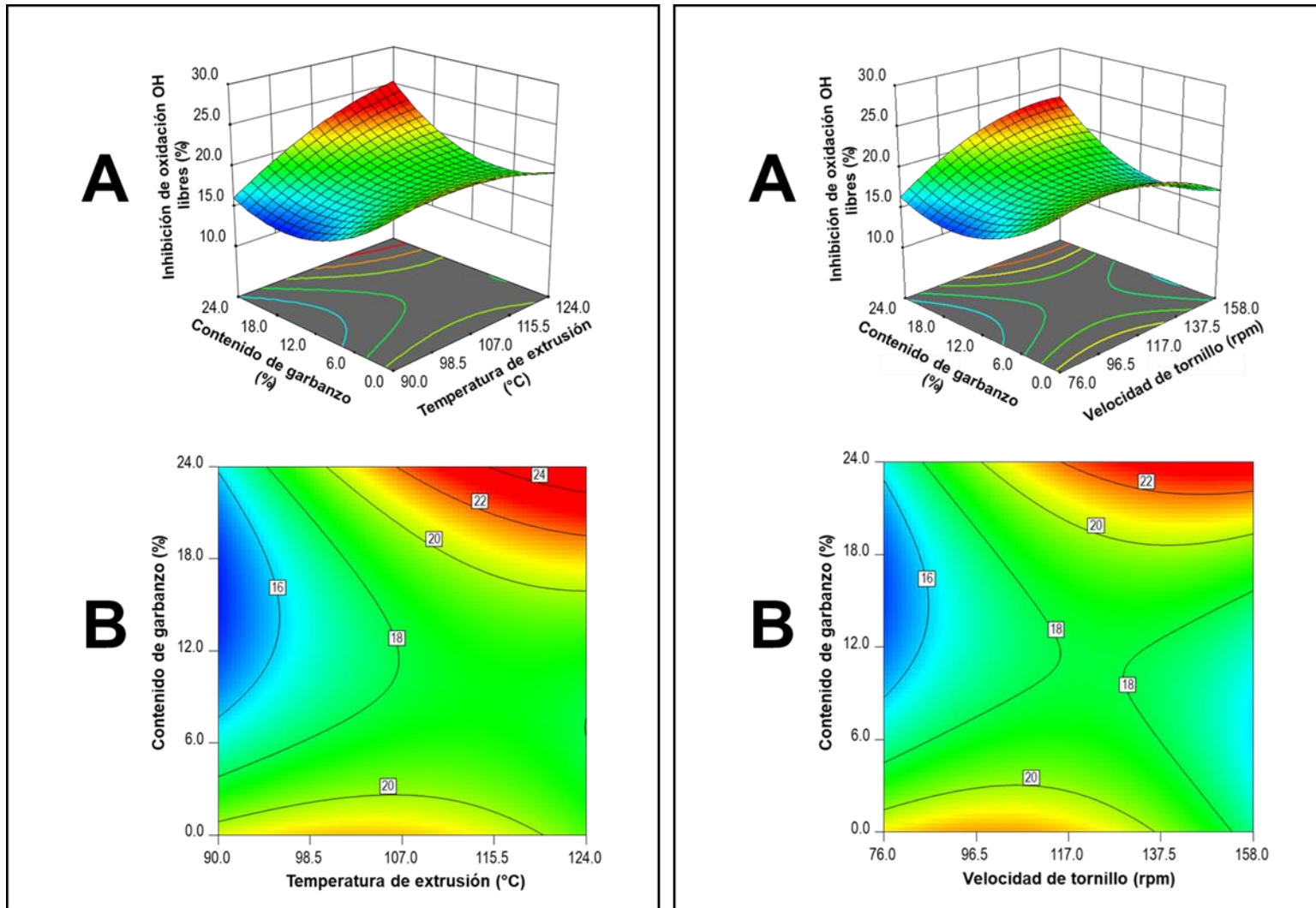


Figura 20. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de garbanzo (CG) (VT= 117 rpm), así como efecto de la velocidad de tornillo (VT) y contenido de garbanzo (CG) (TE= 107 °C) sobre la inhibición de oxidación del radical OH de extractos libres (DeoxiLib) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.

Este comportamiento puede correlacionarse con el contenido de compuestos fenólicos encontrado en la harina de garbanzo y a la liberación de compuestos con capacidad antioxidante presentada a altas TE.

Sami y col (2017) estudiaron el efecto de las variables de proceso de extrusión, temperatura de extrusión (TE), velocidad de tornillo (VT), y contenido de humedad (CH) sobre la capacidad de inhibición del radical OH en hidrolizados de soya, donde se observó que el procesamiento térmico alteró el perfil antioxidante. Dichos autores reportaron que a un CH= 10% y una VT= 100 rpm, al incrementar al TE hasta 105°C, el % de inhibición del radical OH se incrementó hasta 91.7 %. La TE mostró el mayor efecto en dicho trabajo, lo cual pudo deberse a la liberación y/o modificación de compuestos con alta capacidad antioxidante a altas TE.

En la **Figura 20** se muestra el efecto de la VT y el CG sobre la actividad antioxidante DeoxiLib de las pastas alimenticias libres de gluten, a una TE= 107°C. Puede observarse que los mayores valores de la inhibición de la oxidación por el radical hidroxilo de extractos libres (DeoxiLib, >22 %) se presentaron a niveles altos (>18 %) de CG y altas (>117 rpm) VT. Este comportamiento es similar al presentado para la actividad antioxidante ABTST, donde se observó que conforme se incrementaron las VT, aumentó la actividad antioxidante atribuida a un menor tiempo de residencia de los materiales dentro del extrusor, y al elevado contenido de compuestos con actividad antioxidante presentes en la harina de garbanzo.

Ghiassi y col (2012) estudiaron la inhibición del radical hidroxilo de extractos de garbanzo crudo, donde observaron valores de inhibición de 15 y 78%, utilizando

extractos metanólicos y acetónicos, respectivamente, atribuyendo esta diferencia a la polaridad del solvente y al tipo de compuestos extraídos.

En el presente estudio DeoxiLib presentó una alta correlación positiva con TE ($r=0.66$, $p=0.001$) y con ABTST ($r=0.69$, $p<0.001$).

f. Inhibición de oxidación por el radical hidroxilo de extractos ligados (DeoxiLig)

Para el análisis de la variable de respuesta inhibición de oxidación por el radical hidroxilo de extractos ligados (DeoxiLig), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p<0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada}= 0.94$, $CV= 4.71\%$, sin presentar falta de ajuste ($p= 0.09$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p=0.03$) y en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p<0.01$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) también mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p<0.01$) y en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p<0.01$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este también mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p<0.01$) y en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p<0.01$). En el análisis de interacciones, se encontró que solamente la interacción TE*CG (b_{13} , $p=0.04$) presentó efecto significativo (**Cuadro 15**), mientras que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p=0.23$) y VT*CG (b_{23} , $p=0.14$) no presentaron efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{DeoxiLig} = 22.30 + 0.83*TE + 1.22*VT + 4.75*CG + 0.55*TE*VT + 0.98*TE*CG \\ + 0.68*VT*CG + 2.58*TE^2 + 1.40*VT^2 + 1.41*CG^2$$

En la **Figura 21** se muestra el efecto de la TE y el CG sobre la inhibición de la oxidación por el radical OH de DeoxiLig de las pastas alimenticias libres de gluten, a una VT=117 rpm. Puede observarse que al incrementarse los niveles del CG se obtuvo un aumento de la actividad antioxidante DeoxiLig en todo el intervalo de TE estudiado. Los mayores valores de la inhibición de la oxidación del radical hidroxilo de extractos ligados (DeoxiLig, >30 %) se presentaron a valores altos (>18 %) de CG. Este comportamiento pudo deberse a los mayores valores de capacidad antioxidante DeoxiLig presentados por la harina de garbanzo en relación a la harina de arroz quebrado que fue la otra materia prima utilizada para la producción de las pastas alimenticias

Este comportamiento es similar al reportado por Ruiz-Armenta (2020), quien elaboró botanas de tercera generación a partir de maíz amarillo y subproductos de naranjita, donde se observó que el aumento en la capacidad de atrapamiento de la fracción ligada podría deberse al alto contenido de compuestos fenólicos presentes, en forma ligada en cereales como el maíz.

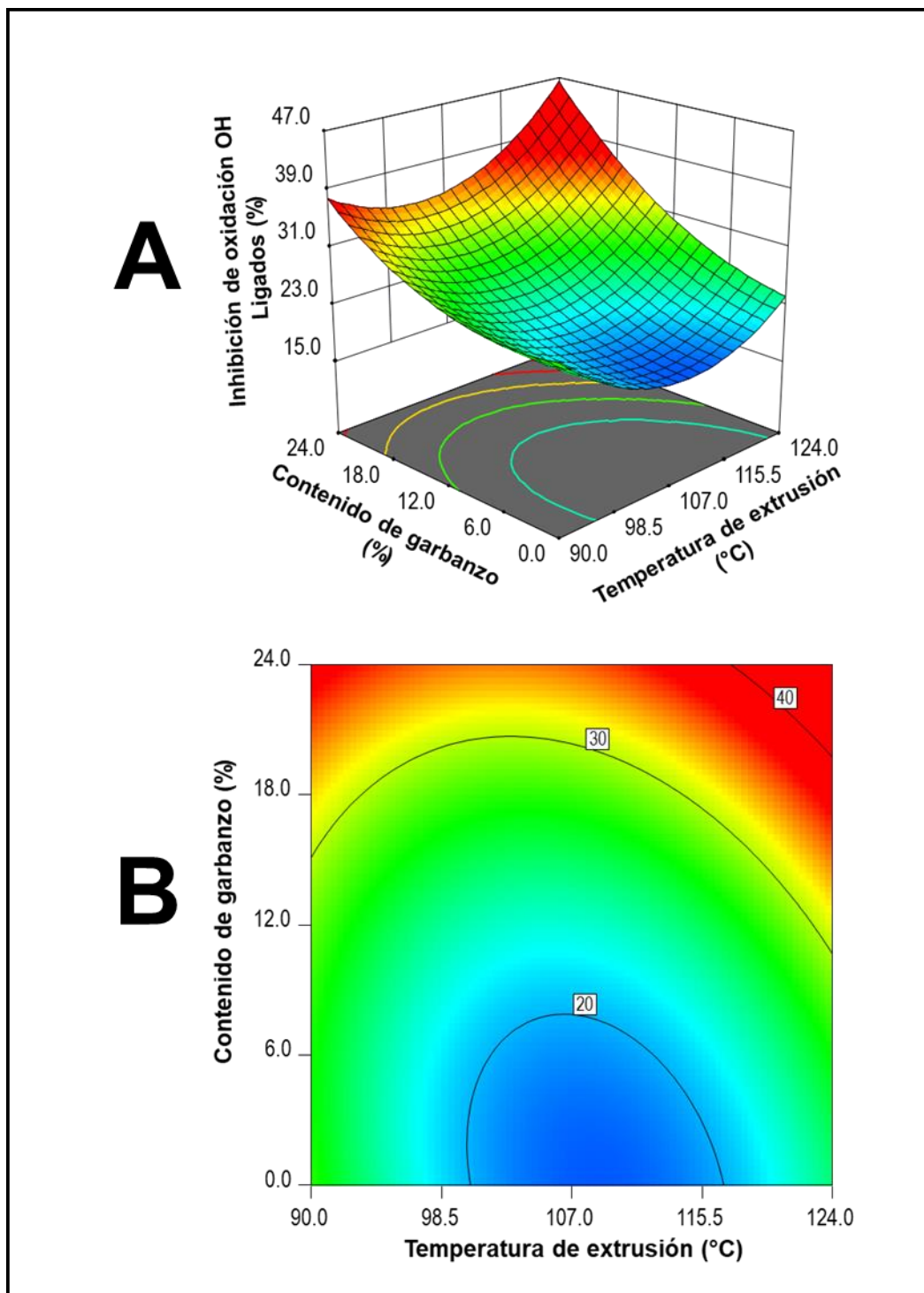


Figura 21. Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la inhibición de oxidación por el radical OH de extractos ligados (DeoxiLig) de pastas alimenticias libres de gluten (VT= 117 rpm). A, superficies y B, contornos.

g. Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos libres (LDLLib)

La enfermedad aterosclerosis en humanos puede ser causada por diferentes factores, entre ellos la modificación oxidativa de las lipoproteínas de baja densidad (LDL). Las investigaciones sugieren que los alimentos ricos en compuestos fenólicos pueden tener actividad antioxidante que puede disminuir el grado de oxidación de las LDL (Amarowicz y Pegg, 2017).

Para el análisis de la variable de respuesta inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos libres (LDLLib), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.80$, $CV = 5.06\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.17$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (TE², b_2 , $p < 0.01$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.94$) ni en su término cuadrático (VT², b_{22} , $p = 0.46$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este factor tampoco presentó efecto significativo en sus términos lineal (CG, b_3 , $p = 0.16$) y cuadrático (CG², b_{33} , $p = 0.31$). En el análisis de interacciones, se obtuvo que solamente la interacción VT*CG (b_{23} , $p = 0.05$) presentó efecto significativo (**Cuadro 15**), mientras que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p = 0.41$) y TE*CG (b_{13} , $p = 0.23$) no presentaron efecto. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{LDLLib} = 75.56 + 6.38*TE + 0.06*VT + 1.44*CG + 1.06*TE*VT + 1.60*TE*CG - 2.46*VT*CG - 5.74*TE^2 - 0.70*VT^2 - 0.99*CG^2$$

La **Figura 22** muestra el efecto de la VT y el CG sobre la inhibición de la oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos libres (LDLLib) de las pastas alimenticias libres de gluten, a una TE= 107°C. Los valores más altos (>70 %) se presentaron combinando niveles bajos (<117 rpm) de VT y niveles altos (>12 5) de CG. Estos valores pueden atribuirse a una mayor retención de compuestos antioxidantes a bajas VT, debido a un menor daño mecánico. Asimismo, puede deberse a la mayor inhibición de la oxidación de las LDL mostrada por la harina de garbanzo en relación a la harina de arroz quebrado, que fue la otra materia prima utilizada para la producción de las pastas libres de gluten.

Yang y col (2007) estudiaron el potencial del garbanzo en la dieta para revertir la dislipidemia inducida en ratas por una dieta crónica rica en grasas. En dicho trabajo, se obtuvo que la suplementación con garbanzos (10% p/p) indujo un perfil lipídico favorable para disminuir los niveles de triacilgliceroles, LDL y la relación LDL:HDL. De igual manera, Pittaway y col (2006) reportaron que la suplementación dietética con garbanzos dió como resultado una reducción de los niveles séricos totales y de colesterol LDL en mujeres y hombres hipercolesterolémicos, en comparación con una dieta suplementada con trigo, observando mejoras en el perfil de lípidos séricos, colesterol total sérico, y c-LDL.

En el presente estudio LDLLib presentó una moderada correlación positiva con DeoxiLib ($r=0.48$, $p=0.06$).

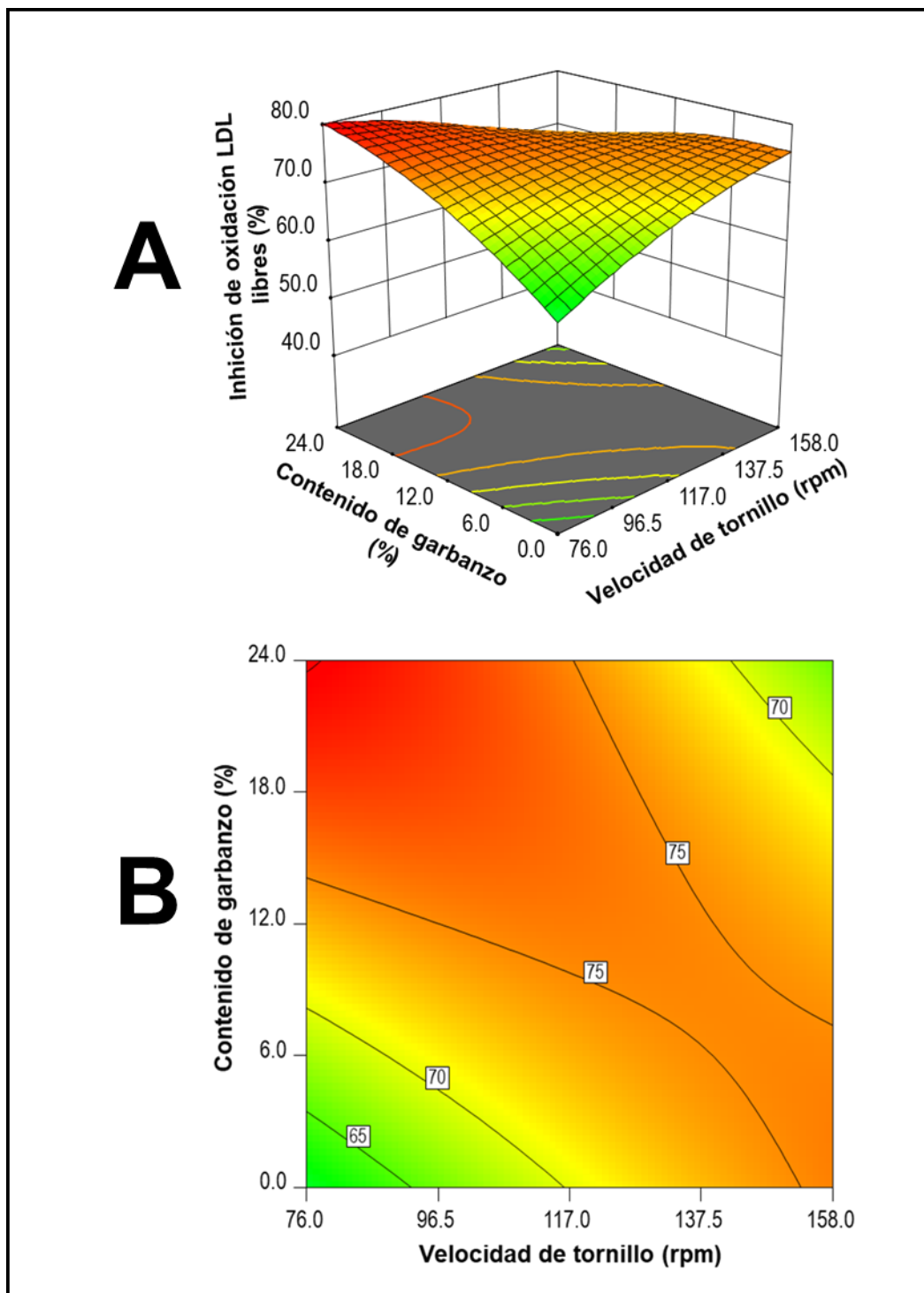


Figura 22. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la inhibición de oxidación de las LDL de extractos libres (LDLLib) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). A, superficies y B, contornos.

h. Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos ligados (LDLLig)

Para el análisis de la variable de respuesta inhibición de oxidación de las lipoproteínas de baja densidad de extractos ligados (LDLLig), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ($p < 0.01$), obteniendo un valor de $R^2_{ajustada} = 0.78$, $CV = 5.42\%$, sin presentar falta de ajuste ($p = 0.20$) (**Cuadro 13**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que el factor temperatura de extrusión (TE) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE, b_1 , $p = 0.61$), pero sí mostró efecto en su término cuadrático (TE^2 , b_2 , $p < 0.01$). Asimismo, el factor velocidad de tornillo (VT) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (VT, b_2 , $p = 0.86$), pero sí mostró efecto en su término cuadrático (VT^2 , b_{22} , $p < 0.001$). En el caso del factor contenido de harina de garbanzo extrudido (CG), este mostró efecto significativo en su término lineal (CG, b_3 , $p < 0.01$) y en su término cuadrático (CG^2 , b_{33} , $p < 0.01$). En el análisis de las interacciones, se obtuvo que solamente la interacción VT*CG (b_{23} , $p = 0.05$) presentó efecto significativo, mientras que las interacciones TE*VT (b_{12} , $p = 0.20$) y TE*CG (b_{13} , $p = 0.22$) no presentaron efecto significativo (**Cuadro 15**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{LDLLig} = & 57.65 - 0.51*TE - 0.17*VT + 3.85*CG - 1.72*TE*VT - 1.65*TE*CG \\ & + 2.69*VT*CG + 4.87*TE^2 + 4.44*VT^2 + 3.60*CG^2 \end{aligned}$$

En la **Figura 23** se muestra el efecto de la VT y el CG sobre la inhibición de la oxidación de las LDL del extracto ligado (LDLLig) en las pastas alimenticias libres de gluten, a una $TE = 107^\circ\text{C}$. Puede observarse que los menores valores de inhibición de oxidación de las lipoproteínas de baja densidad de los extractos ligados (LDLLig) (< 60

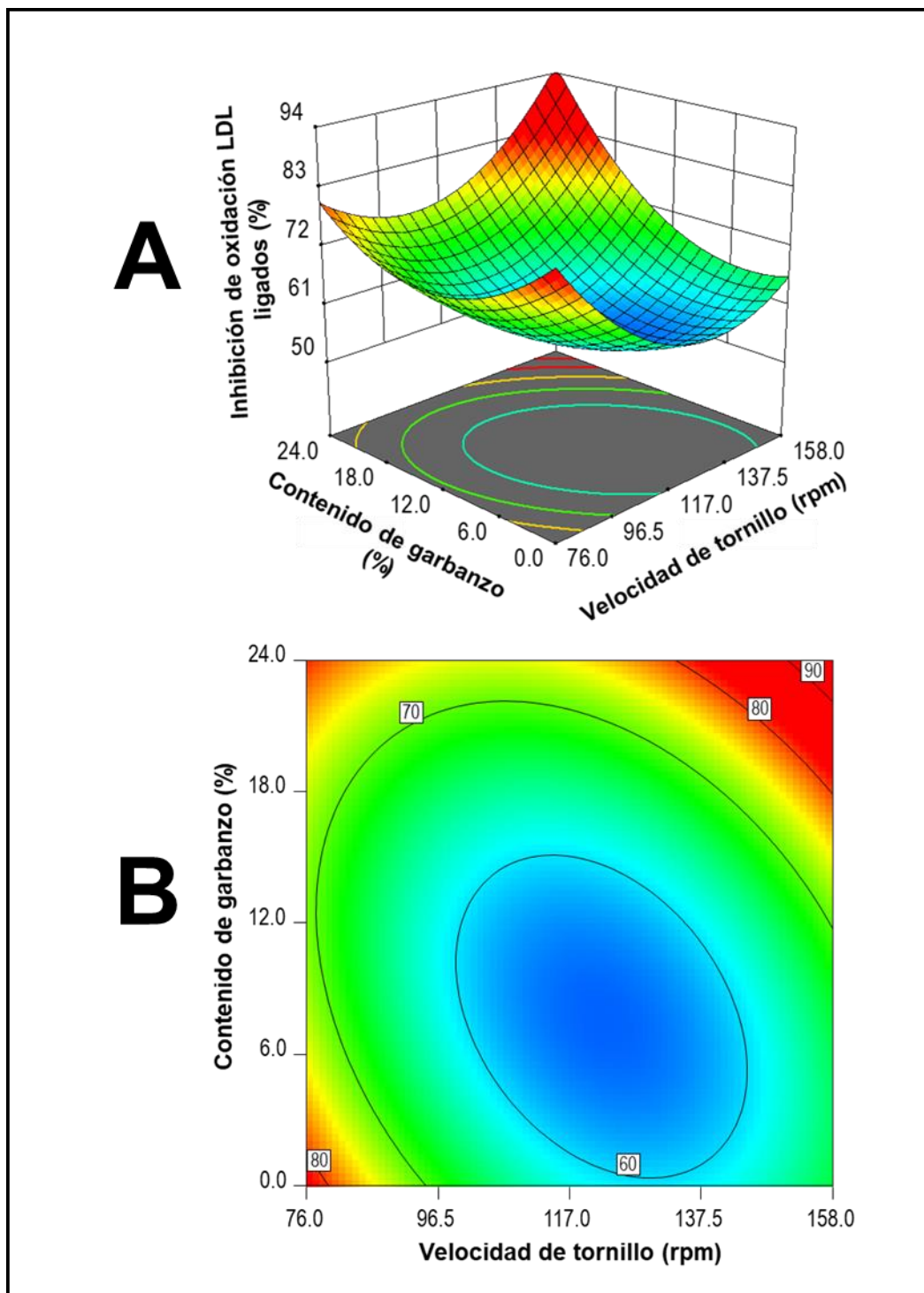


Figura 23. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y el contenido de garbanzo (CG) sobre la inhibición de oxidación de las LDL de extractos ligados (LDLLig) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). A, superficies y B, contornos.

%) se presentaron en un punto mínimo, obtenido a niveles intermedios de CG (2-12 %) y de VT (117-137.5 rpm). Asimismo, los mayores valores (>74 %) de LDLLig se obtuvieron a niveles altos de CG (>18 %) y altas VT (>137.5 rpm). Esto pudo deberse a un mayor contenido de compuestos fenólicos a altos contenidos de garbanzo. Costa-Mugica y col (2012) reportaron resultados similares en la evaluación de la inhibición de la oxidación de las LDL en la alga *Halimeda incrassata*, asociando la mayor inhibición a la mayor presencia de compuestos fenólicos, ya que las fracciones ricas en fenoles mostraron mayor capacidad para inhibir la oxidación mediada por iones Cu^{2+} .

Asimismo, a altas VT, se pudo haber presentado menor pérdida de compuestos fenólicos ligados por un menor tiempo de residencia de las muestras dentro del extrusor. De acuerdo con Shahidi y col (2015) el papel de los fenólicos en las enfermedades cardiovasculares está bien fundamentado, contribuyendo las leguminosas en la prevención de dichas enfermedades.

De igual manera, Sedaghat y col (2019) llevaron a cabo un ensayo clínico y demostraron que el consumo de una leguminosa como la soya disminuyó el nivel de colesterol sérico total y colesterol LDL en pacientes con diabetes tipo 2.

En el presente estudio LDLLig presentó una moderada correlación positiva con DPPHLig ($r=0.55$, $p=0.01$) y una alta correlación positiva con DeoxiLig ($r=0.71$, $p<0.001$).

4. Optimización del proceso de extrusión

Se llevó a cabo la optimización del proceso de extrusión utilizando el método numérico, para determinar las mejores condiciones de procesamiento en donde se obtuvieran las pastas alimenticias libres de gluten a base de harina de arroz quebrado (HAQ) y harina de garbanzo extrudido (HG) con las mejores propiedades de cocción, color y mayor contenido de compuestos fenólicos totales (CFT). Para llevar a cabo la optimización, se eligieron las variables de respuesta tiempo de cocción (TC), pérdida de sólidos por cocción (PSC), parámetro de color b^* , y contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), estableciéndose diferentes criterios para cada una de las variables de respuesta (**Cuadro 16**), teniéndose como objetivo la obtención de los menores valores para las variables de TC y PSC, y los mayores valores para el parámetro de color b^* y CFT. Se eligieron las variables de respuesta TC y PSC para la optimización del proceso debido a que son uno de los principales parámetros de calidad en las pastas alimenticias, mientras que se eligió el parámetro de color b^* debido a que la harina de garbanzo extrudido le aporta una coloración amarilla a las mismas, dándole una tonalidad similar a las pastas tradicionales (elaboradas a base de sémola de trigo), lo que podría ser atractivo para el consumidor. Asimismo, se utilizó el CFT en la optimización debido a que la HG es una fuente importante de CFT, cuyo consumo podría tener potenciales beneficios a la salud, previniendo diferentes tipos de enfermedades.

La **Figura 24** muestra las barras de deseabilidad individual de cada una de las variables de respuesta utilizadas en la optimización, así como la deseabilidad global o combinada del proceso. Se puede observar que la deseabilidad individual de los

Cuadro 16. Criterios y límites utilizados para la optimización del proceso de extrusión en la obtención de pastas alimenticias libres de gluten a partir de harinas de arroz quebrado y garbanzo extrudido.

Nombre	TE^a	VT^a	CG^a	TC^b	PSC^b	b^{*b}	CFT^b
Objetivo	Rango	Rango	Rango	Mínimo	Mínimo	Máximo	Máximo
Límite inferior	90	76	0	7	5.02	28	1.2
Límite superior	124	158	24	12	9	30.71	1.86
Importancia	3	3	3	3	3	3	3
Peso	1	1	1	1	1	1	1

^aFactores: TE=Temperatura de extrusión; VT=Velocidad de tornillo; CG= Contenido de harina de garbanzo extrudido; ^bvariables de respuesta: TC=Tiempo de cocción; PSC=Pérdidas de sólidos por cocción; b*=Parámetro de color b*(azul-amarillo); CFT=Compuestos fenólicos totales.

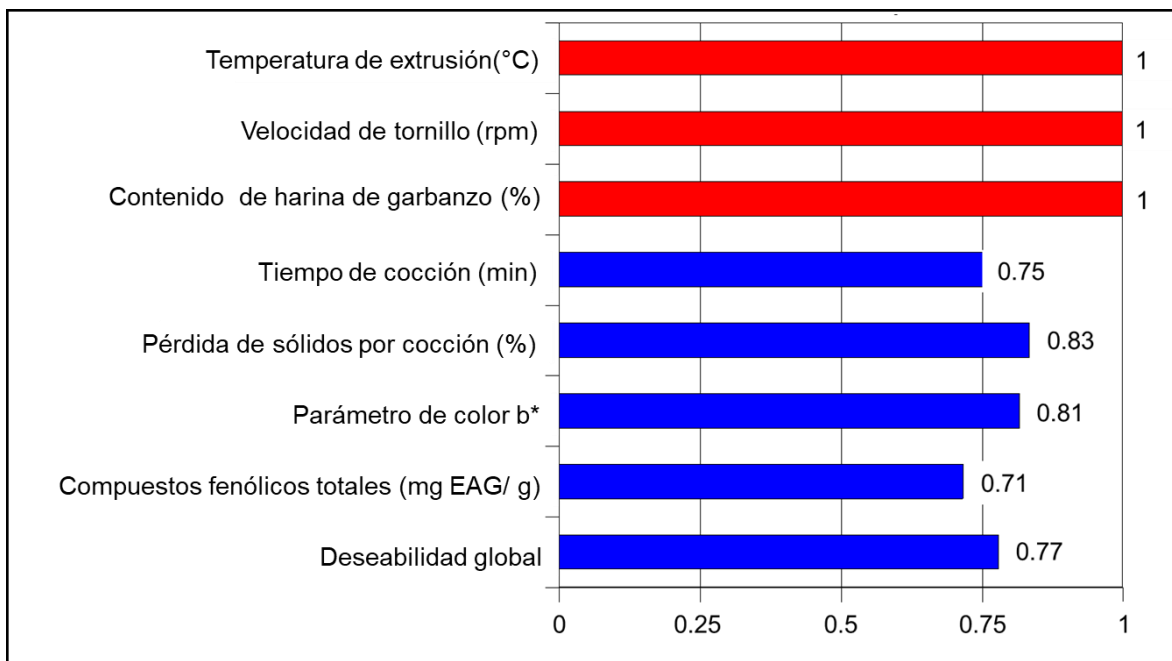


Figura 24. Deseabilidad individual y global (combinada) de las variables de proceso y respuestas analizadas durante la optimización.

factores de estudio temperatura de extrusión, velocidad de tornillo y contenido de harina de garbanzo extrudido fue de 1.0, ya que al elegir los criterios se les asignó como objetivo rango, lo cual indica que siempre darán una deseabilidad de 1.0. En este tipo de optimización la deseabilidad máxima que puede ser obtenida es de 1.0, mientras que la deseabilidad mínima es de 0.

La respuesta de TC mostró una deseabilidad de 0.75, indicando que alcanzó aproximadamente el 75 % de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de TC. Asimismo, la variable de respuesta PSC mostró una deseabilidad de 0.83, indicando que alcanzó aproximadamente el 83 % de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de PSC. El parámetro de color b^* mostró una deseabilidad de 0.81, lo cual significa que alcanzó aproximadamente el 81 % de la diferencia del límite superior menos el límite inferior del parámetro de color b^* . En el caso del contenido de CFT, presentó una deseabilidad de 0.71, indicando que alcanzó aproximadamente el 71 % de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de CFT. La deseabilidad global (DG) o combinada está representada por la siguiente fórmula: $DG = (d_1 d_2 \dots d_m)^{1/m}$. Dónde: d_1 representa el valor de deseabilidad de las respuestas independientes y m es el número de respuestas. $DG = (0.75 \cdot 0.83 \cdot 0.81 \cdot 0.71)^{1/4}$, obteniéndose un valor de 0.77.

Como resultado del presente estudio de optimización se obtuvo que las mejores condiciones de procesamiento fueron: $TE = 117 \text{ }^\circ\text{C}$, $VT = 134.4 \text{ rpm}$, y $HG = 12.57 \%$, obteniéndose los siguientes valores predichos (**Cuadro 17**) por cada uno de los modelos matemáticos correspondientes: $TC = 8.22 \text{ min}$, $PSC = 5.68 \%$, $b^* = 30.22$, y $CFT = 1.67 \text{ mg EAG/g}$. Para llevar a cabo la validación de los modelos matemáticos se elaboraron pastas alimenticias con las materias primas (harina de arroz quebrado +

Cuadro 17. Valores predichos por el modelo y experimentales de las variables utilizadas en la optimización de pastas libres de gluten a base de harina de arroz quebrado y garbanzo extrudido.

Variables de respuesta	Valores predichos	Valores¹ experimentales
Tiempo de cocción (min)	8.22	8.5 ± 0.5
Pérdidas de sólidos por cocción (%)	5.68	5.84 ± 0.21
Color b*	30.22	31.03 ± 0.84
Compuestos fenólicos totales (mg EAG/ g)	1.67	1.78. ± 0.29

¹ Media ± desviación estándar

harina de garbanzo extrudido) utilizando las mejores condiciones de procesamiento obtenidas mediante optimización, mencionadas anteriormente. Se llevaron a cabo los análisis de las pruebas de cocción, parámetro de color b^* y contenido de compuestos fenólicos totales en las pastas obtenidas en las condiciones óptimas, obteniéndose los siguientes valores experimentales promedio y sus desviaciones estándar: $TC = 8.5 \pm 0.5 \%$, $PSC = 5.84 \pm 0.21 \%$, $b^* = 31.04 \pm 0.84$, $CFT = 1.78 \pm 0.29 \text{ mg EAG/g}$.

Al comparar los valores experimentales obtenidos contra los valores predichos por los modelos matemáticos, se encontró que no hubo diferencia estadística significativa en ninguna de las respuestas utilizadas para el proceso de optimización. Por tanto, el modelo empleado demostró tener un buen ajuste experimentalmente, para encontrar las variables del proceso de extrusión en donde se obtengan pastas alimenticias libres de gluten con buenas propiedades de cocción y color, además de un alto contenido de CFT.

En el **Cuadro 18** se reportan los valores para las diferentes características químicas de las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento (PO). En estas se obtuvo un valor de humedad de $10.68 \pm 0.01 \%$, que fue similar al contenido de humedad obtenido en la pasta control elaborada a base de arroz (PC), pasta comercial de arroz (PCA), y pasta comercial elaborada a base de sémola de trigo (PCST), donde se obtuvieron valores de $10.40 \pm 0.02 \%$, $8.77 \pm 0.12 \%$ y $10.8 \pm 0.02 \%$, respectivamente. De igual manera, en PO se obtuvieron datos superiores de cenizas y proteínas con respecto a la PC, PCA y PCST, presentando valores de $1.04 \pm 0.01 \%$ y $11.18 \pm 0.01 \%$ respectivamente. Asimismo, para el caso de carbohidratos, se obtuvieron datos similares entre la PO y PCA, con un valor de 86.54 ± 0.01 ,

Cuadro 18. Composición química (% b.s.) y valor energético (kcal/100g) de las pastas alimenticias.

	PO	PC	PCA	PCST
Humedad	10.68 ± 0.01	10.40 ± 0.02	8.77 ± 0.12	10.8 ± 0.02
Cenizas	1.04 ± 0.01	0.58 ± 0.03	0.75 ± 0.01	0.88 ± 0.03
Extracto Etéreo	0.04 ± 0.01	0.01 ± 0.02	0.01 ± 0.01	0.2 ± 0.02
Proteínas	11.18 ± 0.01	2.41 ± 0.4	3.03 ± 0.01	10.03 ± 0.01
Fibra cruda	1.20 ± 0.01	2.51 ± 0.04	0.98 ± 0.01	3.02 ± 0.01
Carbohidratos	86.54 ± 0.01	94.49 ± 0.02	86.8 ± 0.01	74.1 ± 0.01
Valor energético	391.24 ± 0.01	387.69 ± 0.01	360 ± 0.01	337.8 ± 0.02

Media ± Desviación estándar

*Calculado por diferencia de 100

Pasta óptima (PO, 12.57% harina de garbanzo extrudido y 87.53 % arroz quebrado), pasta control (PC, 100 % arroz quebrado), pasta comercial de arroz (PCA, arroz y maíz), y pasta comercial elaborada a base de sémola de trigo (PCST, 100 5 sémola de trigo).

presentando estos tratamientos valores ligeramente superiores de extracto etéreo y fibra cruda, con valores de 0.04 ± 0.01 y 1.20 ± 0.01 , respectivamente.

En cuanto a los análisis de parámetros físicos y fisicoquímicos (**Cuadro 19**), se obtuvieron valores de índice de expansión de 1.07 ± 0.01 , densidad aparente $1742.41 \pm 6.02 \text{ kg/m}^3$, índice de solubilidad en agua de $5.24 \pm 0.98 \%$, e índice de absorción de agua $4.38 \pm 0.23 \text{ g.a.a./g.s.s.}$ En el análisis de color, se obtuvo un valor para L^* de 52.12 ± 0.81 , color a^* 5.02 ± 0.41 , color b^* 31.03 ± 0.84 , y ΔE de 41.47 ± 0.74 . Para el caso de las pruebas de cocción (**Cuadro 19**), se obtuvo un valor de tiempo de cocción de $8.5 \pm 0.50 \text{ min}$, aumento de peso $204.09 \pm 1.32\%$, aumento de volumen $60.62 \pm 0.67 \%$, y pérdidas de sólidos por cocción de $5.84 \pm 0.21\%$.

Por otro lado, se llevó a cabo la determinación del contenido de compuestos fitoquímicos, actividad antioxidante y parámetros biológicos evaluados en las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento (**Cuadro 20**). En el caso del contenido de carotenoides totales (CT), se obtuvo un valor de CT de $1.78 \pm 0.81 \mu\text{g } \beta\text{-caroteno/g}$. En los análisis del contenido de compuestos fenólicos, se encontró un contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) de $1.78 \pm 0.29 \text{ mg EAG/ g b.s.}$

En el caso de los valores de actividad antioxidante por el método de inhibición de oxidación por el radical hidroxilo (Deoxi), se obtuvieron valores de DeoxiLig $29.34 \pm 0.54 \%$.

Asimismo, se obtuvieron valores del parámetro biológico inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL) del extracto libre (LDLLib) de $77.43 \pm 1.01 \%$, mientras que en el extracto ligado (LDLLig) se obtuvo un valor de $65.25 \pm 0.98 \%$.

Cuadro 19. Valores experimentales de las propiedades físicas, fisicoquímicas, y de cocción evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento.

Variables de respuesta	Valores experimentales¹
Índice de expansión	1.07 ± 0.01
Índice de solubilidad en agua (%)	5.24 ± 0.98
Índice de absorción de agua (g.a.a/ g.s.s.)	4.38 ± 0.23
Luminosidad	50.12 ± 0.81
Color b*	31.03 ± 0.84
Diferencia total de color (ΔE)	41.47 ± 0.74
Tiempo de cocción (min)	8.5 ± 0.50
Aumento de peso (%)	204.09 ± 1.32
Aumento de volumen (%)	60.62 ± 0.67
Pérdidas de sólidos por cocción (%)	5.84 ± 0.21

¹Media ± desviación estándar

Cuadro 20. Características fitoquímicas y biológicas de las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento.

Pruebas	Valores experimentales¹
Carotenoides totales ($\mu\text{g } \beta\text{caroteno/ g}$)	1.78 \pm 0.81
Compuestos fenólicos totales (mg EAG/ g)	1.78. \pm 0.29
AAO-ABTS totales (mg ET/ g)	8.95 \pm 0.42
AAO-DPPH totales (mg ET/ g)	8.59 \pm 0.07
AAO-Deoxi libres (% de inhibición)	19.96 \pm 0.87
AAO-Deoxi ligados (% de inhibición)	29.34 \pm 0.54
AAO-LDL libres (% de inhibición)	77.43 \pm 1.01
AAO-LDL ligados (% de inhibición)	65.25 \pm 0.98

¹Media \pm desviación estándar

5. Fibra dietaria (FD)

La fibra dietaria es una porción del alimento vegetal que es indigerible o que no se descompone completamente en el tracto digestivo del cuerpo humano, y se compone de polisacáridos, oligosacáridos, lignina y ceras (Tosh y Yada 2010). La fibra dietaria se puede clasificar en fibra dietaria soluble (que se puede fermentar en el colon), y fibra dietaria insoluble (metabólicamente inerte) (Kaur y Prasad 2021).

En el **Cuadro 21** se observan los valores de fibra dietaria obtenidos en las materias primas utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten. Se puede observar que la harina de garbanzo extrudido (HG) fue la que presentó mayores valores de fibra dietaria, presentando un valor de FDT de 15.44 ± 0.13 %, 9.24 ± 0.07 % de FDI, y 6.19 ± 0.13 % de FDS. Summo y col (2019), reportaron valores de 11.0 ± 1.5 , 22.1 ± 3.9 y 18.0 ± 3.3 de FDT para garbanzos beige, marrón y negro respectivamente.

Se puede observar que para fibra dietaria total (FDT), insoluble (FDI) y soluble (FDS), los valores más altos se presentaron en la PO (**Cuadro 22**), mientras que los valores más bajos se presentaron en el PCA. De igual forma, los valores más altos de FDI, FDS y FDT se presentaron en las pastas procesadas para PO y PC, teniendo una diferencia significativa ($p < 0.05$) con las mezclas de PO y PC sin procesar, respectivamente. El mayor contenido de FDT después de la extrusión puede deberse a la formación de almidón resistente, así como al aumento de fibra dietaria soluble asociado con la formación de moléculas más pequeñas y solubles, debido a la rotura de enlaces covalentes y no covalentes de los carbohidratos y proteínas (Menis-Henrique y col 2020).

Cuadro 21. Contenido de fibra dietaria y digestibilidad proteínica *in vitro* de las materias primas utilizadas en la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten.

Propiedad	Materias primas	
	Harina de arroz quebrado (HAQ)	Harina de garbanzo extrudido (HG)
Fibra dietaria insoluble	1.36 ± 0.02 ¹	9.24 ± 0.07
Fibra dietaria soluble	0.90 ± 0.01	6.19 ± 0.13
Fibra dietaria total	2.26 ± 0.04	15.44 ± 0.13
DPIV (%)	56.2 ± 0.64	64.7 ± 0.40

¹Los datos se presentan como media ± desviación estándar; DPIV= Digestibilidad proteínica *in vitro*

Cuadro 22. Contenido de fibra dietaria y digestibilidad proteínica *in vitro* de la pasta control (PC) y pasta obtenida bajo condiciones óptimas de procesamiento (PO) en las diferentes etapas de procesamiento (mezcla sin extrudir (MSI) y pasta extrudida (PE), además de la pasta comercial de arroz (PCA).

Producto	Etapas del proceso	Fibra dietaria (% , b.s.)			DPIV
		Fibra insoluble	Fibra soluble	Fibra total	
PC	MSI	1.39 ± 0.19 ^b	1.01 ± 0.32 ^b	2.40 ± 0.51 ^b	53.2 ± 1.22 ^b
	PE	1.75 ± 0.28 ^a	1.55 ± 0.15 ^a	3.30 ± 0.43 ^a	75.6 ± 0.18 ^a
PO	MSI	3.76 ± 0.13 ^b	2.18 ± 0.05 ^b	5.94 ± 0.18 ^b	70.9 ± 0.53 ^b
	PE	4.10 ± 0.22 ^a	3.86 ± 0.14 ^a	7.96 ± 0.36 ^a	86.9 ± 0.01 ^a
PCA	PE	0.65 ± 0.12	0.41 ± 0.22	1.06 ± 0.34	76.2 ± 0.74

b.s.= base seca. DPIV= digestibilidad proteínica *in vitro*. PC= pasta control, PO= pasta óptima, PCA= pasta comercial de arroz. Los datos se presentan como media ± desviación estándar, el valor de cada parámetro con diferentes letras en superíndice al comparar la mezcla sin procesar y pasta extrudida es significativamente diferente (prueba LSD. $p \leq 0.05$).

6. Propiedades nutrimentales

a. Digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV)

Las proteínas son macronutrientes esenciales para la dieta humana, siendo la principal fuente de nitrógeno, además de ser fundamentales para la estructura y funciones del cuerpo. La calidad de la proteína vegetal (CPV) se refiere a la biodisponibilidad, digestibilidad y composición de aminoácidos. La digestibilidad representa la cantidad de proteína absorbida por un organismo en relación a la cantidad consumida, y depende de la estructura de la proteína, del procesamiento previo, y de la presencia de compuestos que limitan la digestión. Estos últimos son los llamados factores antinutricionales (FAN). Dentro de estos se encuentran los fitatos, taninos, inhibidores de la tripsina y lectinas. Se sabe que las proteínas de origen animal tienen mejor digestibilidad que las proteínas de origen vegetal, debido a la presencia de FAN en las plantas. Por tanto, la inactivación de FAN durante el procesamiento de alimentos puede aumentar la CPV (Sá y col 2019).

En el **Cuadro 21** se presentan los resultados de digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) de las materias primas utilizadas para la producción de las pastas libres de gluten. Se puede apreciar que la harina de garbanzo extrudido (HG) fue la que presentó más altos valores de DPIV. La harina de arroz quebrado (HAQ) presentó un valor de DPIV de 56.2 ± 0.64 % siendo estos datos menores a los valores reportados por Zhang y col (2012) quienes reportaron valores de digestibilidad que variaron de 82,8–85,1 % y 82,8–84,3 % en arroz indico y japonico respectivamente. Por su parte, la harina de garbanzo extrudido, presentó el mayor porcentaje de DPIV con un valor de 64.7 ± 0.4 %, esto es ligeramente menor a lo reportado por Nosworthy y col (2020)

donde reportaron valores de DPIV de 87.01 en garbanzo extrudido a 650 rpm y 100-120 °C.

Los valores de digestibilidad proteínica in vitro (DPIV) para la pasta comercial de arroz (PCA), pasta control (PC) sin procesar, PC procesada, pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento (PO) sin procesar y PO procesada (**Cuadro 22**) fueron 76.2 ± 0.74 %, 53.2 ± 1.22 %, 75.9 ± 0.18 %, 70.9 ± 0.53 %, 86.9 ± 0.01 %, respectivamente (**Figura 25**). Asimismo, en dicha figura se puede apreciar que el proceso de extrusión incrementó significativamente ($p < 0.05$) la DPIV un 22.2 % en la PC. Por su parte, la PO presentó un incremento significativo ($p < 0.05$) del 16 % como efecto del proceso de extrusión. Este comportamiento se puede deber a que la cocción por extrusión es un proceso térmico de alta temperatura que induce la desnaturalización de las proteínas, mejora la accesibilidad de los sitios susceptibles a la proteólisis y, por lo tanto, mejora la DPIV. De igual manera, por efecto de la TE, se genera una reducción de factores antinutricionales que reducen la digestión; generando una mejora de la digestibilidad de las proteínas (Rathod y Annapure 2017). Esto es similar a lo reportado por Rafiq y col (2016), quienes elaboraron una pasta de arroz integral donde se observó que, al incrementar la TE, la VT y el contenido de humedad, la DPIV se incrementó de 78.67 a 92.56 %. De acuerdo con los autores, esto pudo deberse a la desnaturalización de las proteínas durante el proceso de extrusión, que provocó que se expusieran los sitios, siendo las proteínas más susceptibles a la hidrólisis enzimática.

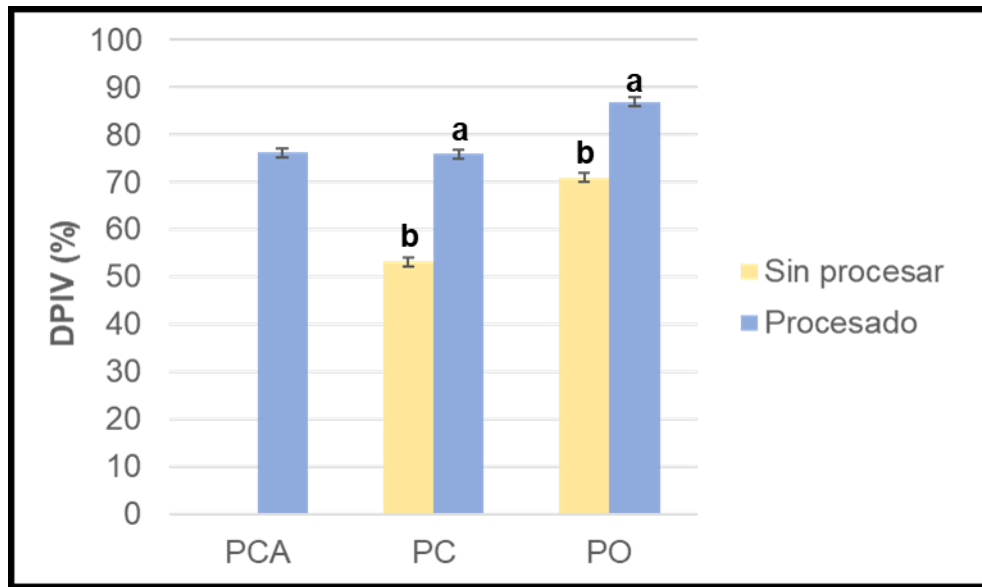


Figura 25. Digestibilidad proteínica *in vitro* (PCA= pasta comercial de arroz; PC= pasta control de arroz; PO= pasta óptima de arroz y garbanzo).

Letras diferentes entre pasta sin procesar y procesada presentan diferencia significativa (prueba LSD. $p \leq 0.05$).

b. Perfil de aminoácidos

Los aminoácidos (AA) se clasifican tradicionalmente como nutricionalmente esenciales (indispensables) o no esenciales (prescindibles), para animales y humanos. Los AA nutricionalmente esenciales (AAE) se definen como aquellos cuyos esqueletos carbonados no pueden sintetizarse *de novo* en células animales, o aquellos que normalmente no son sintetizados *de novo* de manera suficiente por el organismo animal, en relación con sus necesidades de mantenimiento, crecimiento, desarrollo y salud. Por lo anterior, estos deben ser aportados en la dieta para cubrir los requerimientos. Por otro lado, los AA nutricionalmente no esenciales (AANE) son aquellos que el organismo puede sintetizar *de novo* en cantidades adecuadas para satisfacer las necesidades de mantenimiento, crecimiento, desarrollo y salud y, por lo tanto, no es necesario proporcionarlos en la dieta (Hou y col 2015).

En el **cuadro 23** se muestra el contenido de aminoácidos esenciales de la pasta óptima sin procesar y de la pasta optima procesada. El contenido de aminoácidos esenciales de la pasta optima (PO) sin procesar en general fue más bajo que el sugerido por la FAO (2013) para los requerimientos de aminoácidos esenciales en niños con edad superior a 3 años, adolescentes, y adultos, siendo únicamente His, Met, y Trp, los aminoácidos que cumplen con el patrón reportado por la FAO, teniendo como aminoácido limitante en la pasta sin procesar a la Ile.

El contenido de aminoácidos esenciales de la pasta procesada aumentó significativamente ($p < 0.05$), lo cual cumple con el patrón estándar de la FAO (2013), observándose que no presentó aminoácido limitante, debido a que alcanzaron a cubrir

Cuadro 23. Perfil de aminoácidos esenciales¹ y calificación química en la mezcla sin procesar y pasta obtenida en las condiciones óptimas de procesamiento.

Aminoácidos	Mezcla sin procesar		Procesado		FAO*
	g/ 100 g proteína	Calificación química (%)	g/ 100 g proteína	Calificación química (%)	
Histidina (His)	6.40 ± 0.20 ^a	100	3.04 ± 0.17 ^b	100	1.6
Isoleucina (Ile)	0.58 ± 0.06 ^b	19.33	4.43 ± 0.05 ^a	100	3.0
Leucina (Leu)	5.0 ± 0.14 ^b	81.96	10.11 ± 0.04 ^a	100	6.10
Lisina (Lys)	1.79 ± 0.16 ^b	37.29	5.20 ± 0.10 ^a	100	4.80
Metionina (Met)	2.75 ± 0.01 ^b	100	2.38 ± 0.12 ^a	100	1.6
Treonina (Thr)	1.28 ± 0.13 ^b	51.2	4.13 ± 0.13 ^a	100	2.5
Valina (Val)	1.92 ± 0.07 ^b	48	6.17 ± 0.32 ^a	100	4.0
Fenilalanina (Phe)	3.41 ± 0.18 ^b	89.73	6.45 ± 0.15 ^a	100	3.8
Triptófano (Trp)	0.89 ± 0.01 ^a	100	0.80 ± 0.09 ^a	100	0.6
Total	24.04	--	42.71	--	--
Calificación química	19.33	--	100	--	--
AAE limitante	Ile	--	Ninguno	--	--

¹Los datos se presentan como media ± desviación estándar; AAE= Aminoácido esencial; *requerimientos de aminoácidos esenciales para niños, adolescentes y adultos (3 años y mayores) según la FAO (2013); letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa (p<0.05).

el 100% del requerimiento establecido. Moreira y col (2016) reportaron en pastas elaboradas a partir de arroz integral y maíz que a bajas temperaturas de extrusión (63.2 °C a 96.8 °C) y alto contenidos de humedad de alimentación (26.6 g/100 g–43.4 g/100 g) aumentó la retención de aminoácidos, atribuyéndose esto a que a mayor humedad disminuye el cizallamiento, la disipación de energía mecánica, la viscosidad, y la temperatura del producto, generando una mayor retención de aminoácidos.

Asimismo, Singh y col (2007) reportaron que altas velocidades de tornillo y una reducción del diámetro del dado favorecieron la retención del aminoácido Lys, debido a la reducción del tiempo de residencia y cizallamiento del material, así como una menor exposición a la temperatura. Además, el alcance de las modificaciones en las propiedades nutricionales del producto extrudido depende, en gran medida, de la composición de la mezcla de alimentación y los parámetros de extrusión. Es importante una adecuada selección de las materias primas para un mayor valor nutricional.

c. Perfil de minerales

Los minerales desempeñan funciones clave en el organismo humano, desde formar huesos fuertes, hasta transmitir impulsos nerviosos, favoreciendo una vida saludable. De igual manera estos no sólo permiten producir diferentes hormonas, sino que también ayudan a regular los latidos del corazón. Algunos macro y microelementos se encuentran en la estructura de los dientes (Ca, P y F) y de los huesos (Ca, Mg, y Mn), mientras que la mayoría de los microelementos (Cu, Fe, Mn, Mg y Zn) desempeñan un papel vital como parte estructural en muchas enzimas. Los macroelementos (Ca, Mg, P, Na y K), en comparación con los microelementos, tienen

funciones mucho más importantes en las células nerviosas (transmisión y señalización). Aunque los microelementos tienen funciones clave en la formación de células eritrocitarias (I y Fe), los macrominerales como Ca y K tienen un alto potencial para controlar la presión arterial. Los minerales también participan en los sistemas inmunológico (Ca, Mg, Cu, Se y Zn) y cerebral (Cr y Mn) (Gharibzahedi & Jafari 2017).

En el **Cuadro 24** se muestra el contenido de minerales de la pasta alimenticia obtenida en las condiciones óptimas de procesamiento (PO), así como los requerimientos de ingesta diaria de minerales establecidos por la FAO (2013).

Se puede apreciar que la pasta óptima (PO) presentó bajos valores de sodio (Na, 169.70 mg/100 g muestra), siendo estos valores menores a los encontrados en pasta comercial de arroz (PCA) (Na, 250.00 mg /100 g muestra), y mayores a los encontrados en pasta comercial de sémola de trigo (Na, 5.00-100 mg / 100 g muestra). En el caso del contenido de potasio, la PO presentó valores altos (K, 504.8 mg/100 g muestra) en comparación con la PCST (K, 162 mg/ 100 g muestra).

7. Propiedades microestructurales

a. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La **Figura 26A, 26C y 26E** muestra las micrografías de la harina de arroz quebrado (HAQ) a diferentes aumentos (100x, 250x y 500x), en donde puede observarse que los gránulos de almidón del arroz presentaban formas y diámetros esféricas y poligonales de diferentes tamaños, estando parcialmente fragmentados. Asimismo, en el caso de la **Figura 26B y 26D** muestra las micrografías de la harina de garbanzo extrudido a diferentes aumentos (250x y 500x), donde se pueden observar estructuras

Cuadro 24. Contenido de minerales de pastas alimenticias libres de gluten obtenidas de condiciones óptimas de procesamiento (PO), y requerimientos de ingesta diaria.

Minerales	Pasta optima (PO) (mg/ 100 g)	FAO* (mg/ 100 g)
Na	169.70	2000
K	504.8	3510
Ca	3380	1000
Mg	175.2	2600
Fe	42.1	14
Mn	3.048	2
Zn	4.286	7
Cu	0.905	1.5-3

FAO*=requerimientos diarios para adultos >19 años (mg/ 100 g) (FAO 2013)

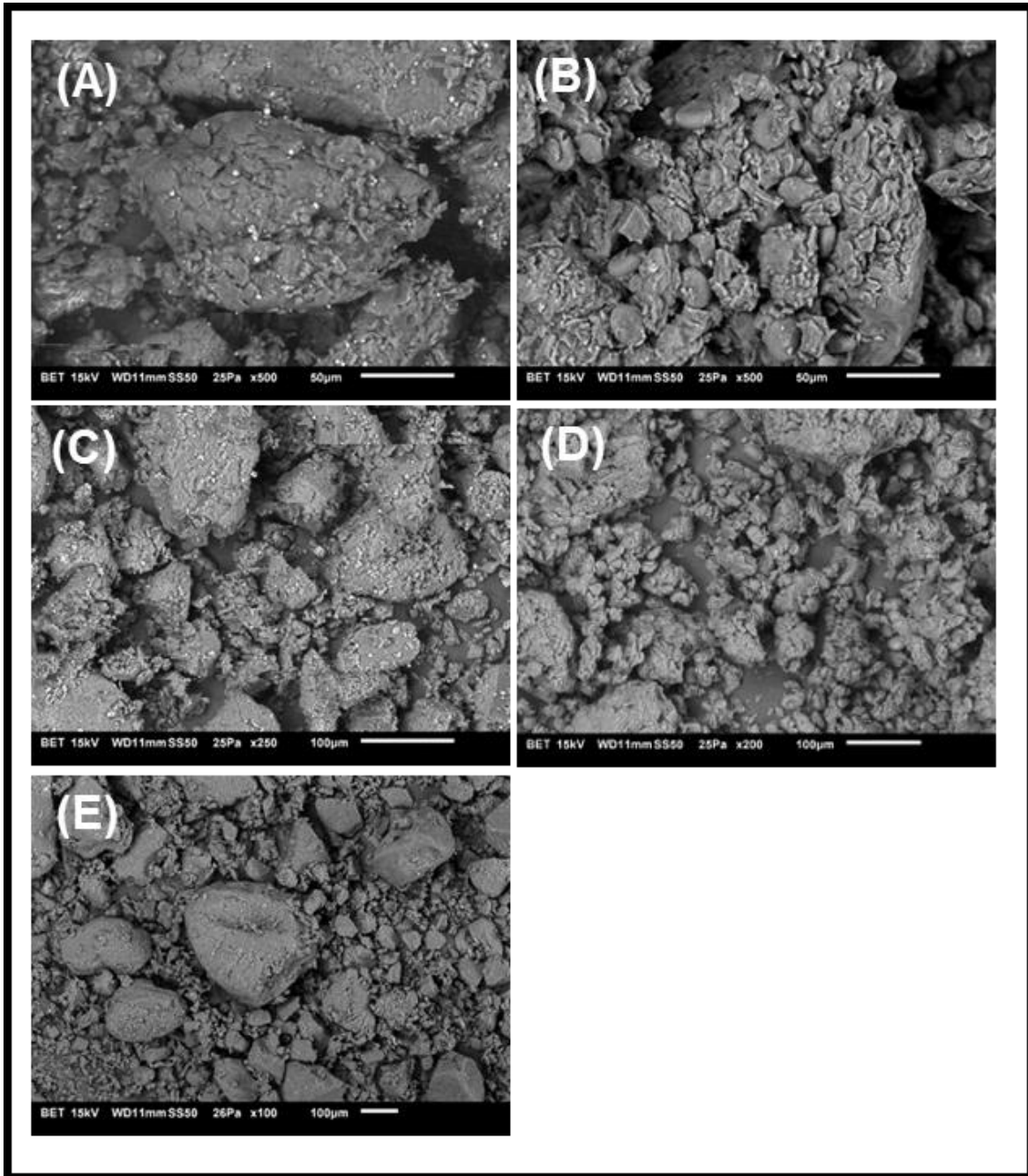


Figura 26. Microscopía electrónica de barrido (MEB) de la materia prima harina de arroz quebrado (A, C y E), y harina de garbanzo extrudido (B y D) utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias a diferentes niveles de aumento (100x, 250x y 500x).

de un menor tamaño con respecto a la HAQ, esto generado por el proceso de molienda y extrusión al que fue sometido el garbanzo, previo a su utilización como materia prima, para la producción de pasta sin gluten, obteniéndose tamaños de partícula menores y un mayor daño en las estructuras presentes.

Asimismo, en la **Figura 27A, 27C y 27F** se muestran las micrografías de la mezcla óptima sin procesar (PO) a diferentes aumentos (100x, 250x y 500x), donde se pueden observar gránulos esféricos y poligonales de diferentes diámetros y con algunas fracturas en su superficie. En la **figura 27B, 27D y 2G7** se muestran las micrografías de la pasta óptima (PO) procesada a diferentes aumentos (100x, 250x y 500x), donde se puede observar una distribución más uniforme de los gránulos de almidón, no se observan fracturas superficiales y con pocos agregados visibles, esto podría atribuirse al proceso de extrusión-cocción que favoreció la formación de estructuras almidón-proteína, lo cual podría relacionarse con los bajos valores de PSC e ISA obtenidos en la PO.

Bouasla y col (2017) elaboraron pasta a partir de arroz y garbanzo, en donde observaron una superficie lisa con un gran aumento atribuido al alto contenido de grasa de la harina de garbanzo, actuando como lubricante durante el procesamiento y formación de las hebras de pasta.

En la **figura 27E y 27H** se muestran micrografías de las pastas control (PC) procesadas a diferentes aumentos (100x y 250x), donde se puede observar, al igual que en la PO procesada, estructuras más compactas sin presencia de fracturas y con diámetros más homogéneos, con respecto a las materias primas.

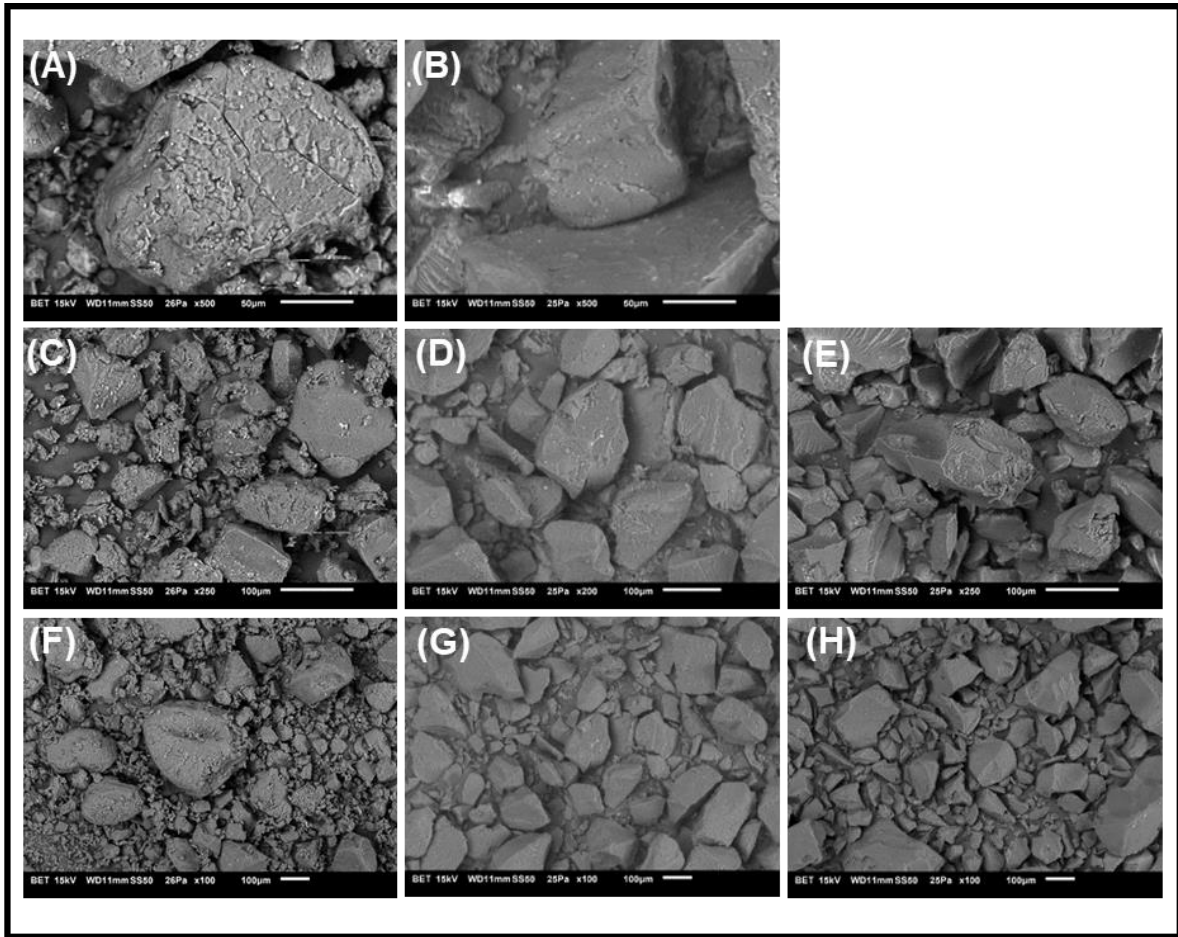


Figura 27. Microscopía electrónica de barrido (MEB) de las pastas alimenticias obtenidas en condiciones óptimas (PO) sin procesar (A, C y F), procesadas (B, D y G), y pasta control (PC) procesada (E y H) a diferentes niveles de aumento (100x, 250x y 500x).

b. Difracción de rayos X y cristalinidad relativa

Los patrones de difracción de rayos X de los compuestos ricos en almidón se definen por picos de absorción y una zona amorfa, donde al ser mayor la zona amorfa, menor es la cristalinidad de la muestra (García y col 2000). La difracción de rayos X y la cristalinidad relativa de las materias primas (harina de arroz quebrado y harina extrudida de garbanzo) se muestran en la **Figura 28A y 28B**. Los patrones de difracción de rayos X de la harina de arroz quebrado mostraron un patrón de cristalinidad tipo A, característico del almidón de cereales, con fuertes reflejos alrededor de 2θ de $\approx 15.18^\circ$, $\approx 17.18^\circ$, $\approx 18.02^\circ$ y $\approx 23.13^\circ$. Estos resultados son similares a los obtenidos por Nagataki y col (2018), quienes estudiaron 4 tipos de arroz y obtuvieron valores donde exhiben un patrón típico tipo A, con difracciones alrededor de 15° , un doblete en 17° y 18° , y 23° . De igual manera, este resultado es similar al patrón de difracción de rayos X de almidón de arroz (Zhu y col 2011). Los patrones de difracción de rayos X de la harina de garbanzo extrudido presentaron un patrón de cristalinidad tipo V con reflejos alrededor de 2θ de $\approx 18.96^\circ$ esto atribuyéndose al proceso previo de extrusión al que fue sometido el garbanzo formando complejos amilosa-lipido. Estos resultados concuerdan con lo reportado por McClure (2022), donde se observaron valores de alrededor de los 19° en garbanzo extrudido lo que indica la presencia de un complejo lipídico de amilosa tipo V.

Para las pastas alimenticias (pasta control y pasta óptima) en sus diferentes etapas de procesamiento (sin procesar, procesadas), los patrones de difracción de rayos X (**figura 29**), en ambas pastas mostraron una intensidad menor en los productos procesados comparados con las materias primas antes mencionadas, y

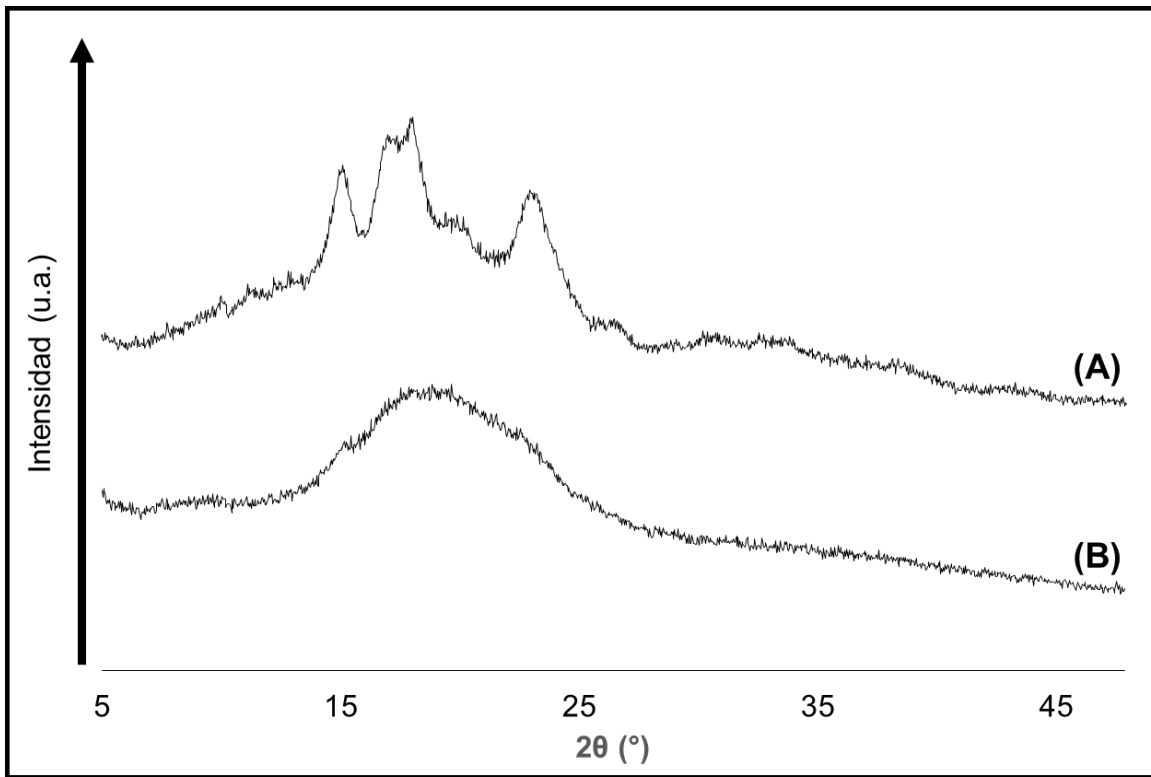


Figura 28. Patrones de difracción de rayos X de las materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas alimenticias, **(A)** harina de arroz quebrado. **(B)** harina de garbanzo extrudido.

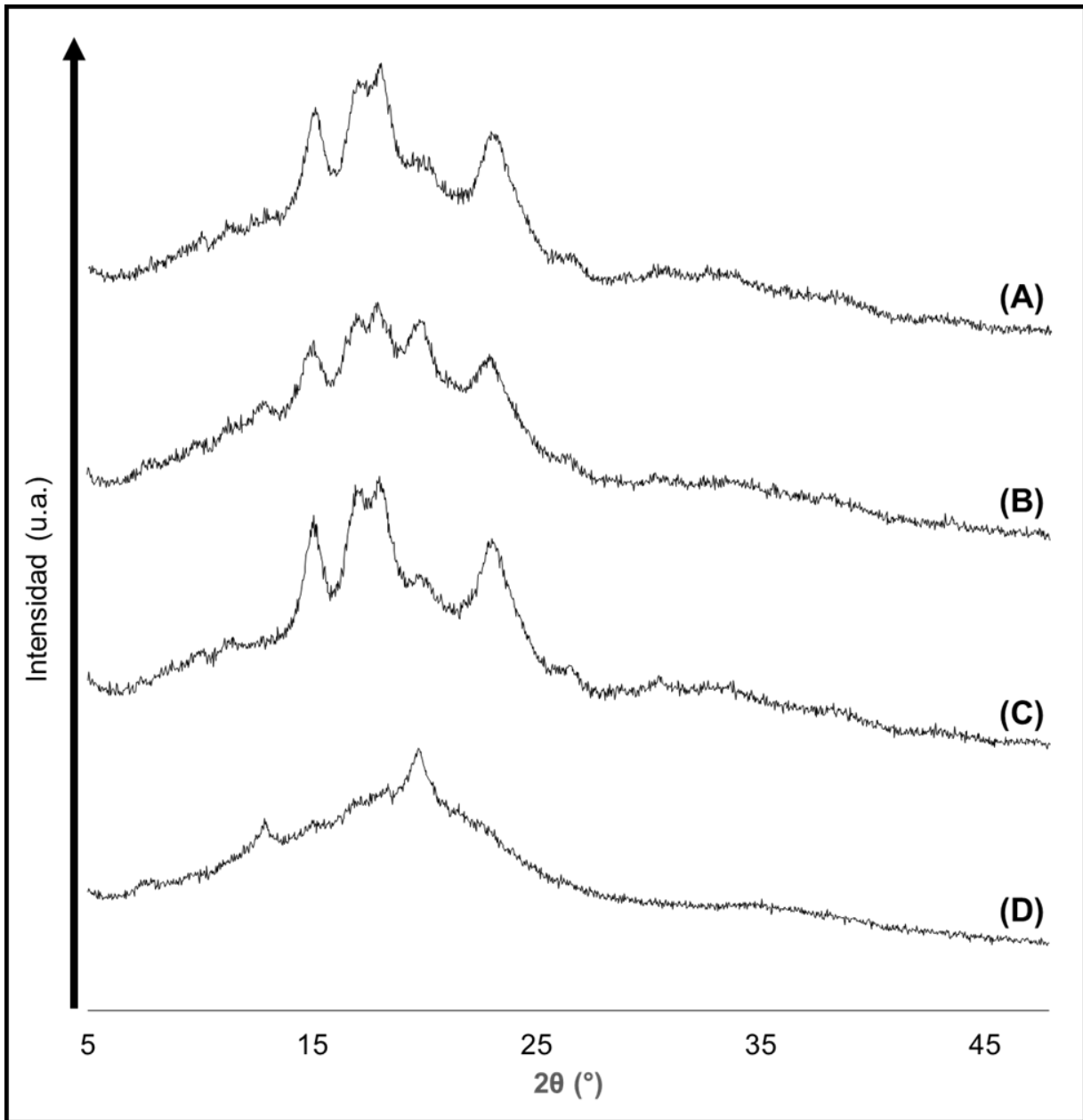


Figura 29. Cambios en los patrones de difracción de rayos X de las pastas alimenticias en sus diferentes etapas de procesamiento, **(A)** pasta control sin procesar a base de arroz quebrado. **(B)** pasta control procesada, **(C)** pasta óptima sin procesar a base de arroz quebrado y garbanzo extrudido, **(D)** pasta óptima procesada.

en las pastas sin procesar en sus picos de cristalinidad con valores de 2θ de $\approx 15.15^\circ$, 18.05° , 19.92° y 23.00° en pastas control procesada; y de 2θ de $\approx 18.49^\circ$ y ≈ 19.82 para pasta óptima procesada, mostrando patrones de cristalinidad de tipo A y B para las pastas óptimas procesadas. Esto podría atribuirse a que durante el proceso de extrusión la estructura cristalina organizada de las materias primas se destruye parcial o totalmente, dependiendo de las condiciones de extrusión, debido principalmente a la temperatura del barril y la humedad de la alimentación. Estos cambios en la estructura también están relacionados con la fuente del almidón y otros componentes presentes en la harina, como proteínas y fibras (Hernández-Nava y col 2011).

El grado de cristalinidad relativa fue 34.03 y 30.21 % para la harina de arroz quebrado y la harina de garbanzo extrudido respectivamente. Esto es parecido a lo reportado por Park y col (2019), quienes reportaron valores de cristalinidad relativa de 31.04 a 40.0 % en variedades de almidón de arroz nativo, de 4 variedades diferentes. De igual manera, los resultados de la harina de garbanzo concuerdan con lo reportado por Sun y col (2015), quienes observaron valores de 31.7% de cristalinidad relativa para almidón de garbanzo nativo.

Asimismo, se observó que las mezclas sin procesar de la pasta control y la pasta óptima tuvieron valores de cristalinidad relativa de 34.03 y 21.98 %, respectivamente, observándose una disminución en sus valores de 14.55 y 4.93 %, en la pasta control procesada y la pasta óptima procesada, respectivamente. La menor disminución de la cristalinidad relativa en la pasta óptima se puede atribuir a la proteína y fibra presente en el garbanzo y las condiciones del proceso de extrusión utilizadas para su procesamiento.

8. Estudio *in vivo* del índice glicémico

El **Cuadro 25** muestra las características e indicadores bioquímicos para la admisión de los participantes que participaron en el estudio *in vivo* del índice glicémico. En la **Figura 30** se muestra un incremento de glucosa en sangre en sujetos sanos posterior a la ingesta de pan blanco (alimento estándar), pasta cocida control (PC) elaborada con harina de arroz quebrado, y pasta óptima (PO), la cual presentó un contenido de 12.57% de harina de garbanzo extrudida en adición a la harina de arroz quebrado, lo anterior se utilizó para la determinación del índice glicémico.

El mayor incremento de las curvas de glucosa se observó con el alimento estándar, a los 30 minutos, comenzando el descenso a partir de los 60 minutos y volviendo a su nivel basal (glicemia en ayunas) al finalizar el tiempo de prueba (120 minutos). Para la PC y la PO se observó un pico de glucosa a los 30 minutos menor al encontrado en el alimento estándar, seguido por un descenso gradual a partir de los 60 minutos y llegando nuevamente a su valor basal cercano al que se obtuvo al inicio de la prueba, a los 120 minutos.

La adición de harina de garbanzo extrudido favoreció la reducción del pico de hiperglucemia y la fase de hiperglucemia total (área bajo la curva) en la PO. La glucosa plasmática máxima se alcanzó durante los primeros 30 minutos, siendo los valores significativamente más bajos para la pasta óptima (44.07 ± 1.24 %) que la pasta control y el alimento estándar (72.15 ± 1.85 %). La adición de harina de garbanzo ayudó a mantener los niveles de glucosa moderados hasta por 120 min. Las concentraciones máximas de glucosa fueron de 115.09 ± 2.1 mg/dl, 107.78 ± 2.8 mg/dl y 98.2 ± 1.6

Cuadro 25. Características e indicadores bioquímicos de admisión de los participantes en el estudio in vivo.

Indicadores	
N° de voluntarios	12
Mujeres	10
Hombre	2
Edad (años)	20 ± 2
Peso (kg)	56.73 ± 1.43
Altura (m)	1.62 ± 0.2
IMC (kg/m²)	21.6 ± 0.17
Glucosa inicial (mg/dl)	82.38 ± 1.27

IMC= Índice de masa corporal

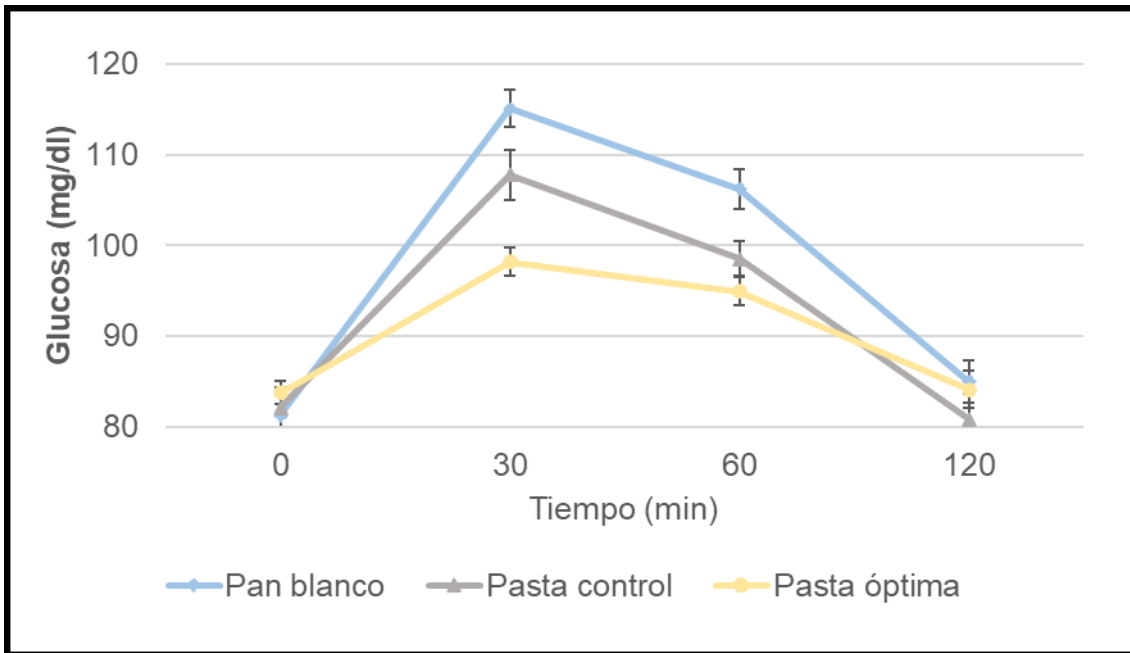


Figura 30. Concentraciones medias de glucosa en sangre en sujetos sanos después de la ingesta de pan blanco, pasta control cocida (PC) y pasta óptima cocida (PO).

mg/dl para el alimento estándar (pan blanco), pasta control y pasta óptima, respectivamente, a los 30 minutos después de su ingesta.

Con los datos obtenidos del ABC del alimento estándar y las pastas evaluadas se obtuvo el valor de índice glicémico y carga glicémica, como se observa en el **Cuadro 26**. El índice glicémico obtenido para la PC fue de 72.15 ± 1.85 , considerado como un alimento de índice glicémico alto. La PO con 12.57 de harina de garbanzo extrudida presentó una disminución del IG del 28.08, con relación a la pasta control, obteniendo un valor de 44.07 ± 1.24 , el cual es considerado un índice glicémico bajo. Atkinson y col (2021) consideran un valor por debajo de 55 como IG bajo, mientras que valores de 56-69 son IG moderados y >70 se consideran IG altos.

En relación a la carga glicémica, la PC presentó una carga glicémica alta (34.09 ± 1.32), siendo esta carga mayor (15.02% aproximadamente) que la PO, que presentó una carga glicémica intermedia (19.07 ± 1.23), atribuyéndose esto a la sustitución con la leguminosa.

Una alternativa saludable en la alimentación, debido a su índice glicémico (IG) bajo demostrado, son las pastas. Granito y col (2014) evaluaron pastas elaboradas con 100% sémola de trigo, pasta formulada con 10% de *Vigna sinensis*, pasta formulada con 12% de *Phaseolus vulgaris* y pasta formulada con 12% de *Cajanus cajan*. El índice glicémico para estas pastas se encontró dentro del rango normal de carbohidratos de absorción lenta e intermedia. de acuerdo con los autores. El índice glicémico fue significativamente menor para las pastas adicionadas con leguminosas (pasta formulada con 10% de *Vigna sinensis* presentó un IG de 65 ± 3.1 , pasta formulada con

Cuadro 26. Índice glicémico (IG) y carga glicémica de pasta control (PC) y pasta óptima (PO)

	IG	Porción (g)	CHO disponibles	Carga glicémica
PC	72.15 ± 1.85 ^a	50	47.24	34.09 ± 1.32 ^a
PO	44.07 ± 1.24 ^b	50	43.27	19.07 ± 1.23 ^b

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas $P < 0.05$. CHO= Carbohidratos. Pasta control (formulada con 100% arroz), pasta óptima (formulada con 12.57% de garbanzo y arroz).

con 12% de *Phaseolus vulgaris* presentó un IG de 63 ± 2.9 , y pasta formulada con 12% de *Cajanus caja* mostró un IG de 62 ± 3.0), comparado con la pasta con 100% de sémola de trigo que presentó un IG de 76 ± 2.6 . Se demostró que las pastas alimenticias con adición de harina de leguminosas presentaron bajos IG, y podrían ayudar a ampliar la gama de alimentos con bajos IG disponibles para el consumidor.

9. Detección de gliadinas

La gliadina contiene secuencias peptídicas (conocidas como epítomos) que son altamente resistentes a la digestión proteolítica gástrica, pancreática e intestinal, en el tracto gastrointestinal, escapando a la degradación en el intestino humano. Esta difícil digestión se debe al alto contenido de aminoácidos, prolina y glutamina en la gliadina, que muchas proteasas no pueden escindir. Estos residuos ricos en prolina crean estructuras estrechas y compactas que pueden mediar las reacciones inmunes adversas en la enfermedad celíaca (Biesiekierski 2017). En el **Cuadro 27** se muestra la detección de gliadinas en la pasta control (PC) y pasta óptima (PO) tanto en la mezcla sin procesar como procesada, en la pasta comercial de arroz (PCA), y en la pasta comercial elaborada a partir de sémola de trigo (PCST). En la PC elaborada solamente con arroz quebrado en su etapa sin procesar y procesada, así como en la PO elaborada con arroz quebrado y garbanzo extrudido en su etapa sin procesar y procesada no se detectaron gliadinas a 5, 10, 15 y 20 ppm. Esto se puede atribuir a la naturaleza libre de gluten de las materias primas utilizadas para la elaboración de dichas pastas. Mientras que, en el caso de la PCA no se detectaron gliadinas a 5, 10 y 15 ppm pero sí se detectaron a 20 ppm. Esto puede ser generado por contaminación cruzada del equipo donde se procesó esta pasta comercial. Sin embargo, un producto

Cuadro 27. Detección de gliadinas de pasta control (PC), pasta óptima (PO), pasta comercial de arroz (PCA) y pasta comercial de sémola de trigo (PCST) en sus diferentes etapas de procesamiento.

Muestra	Etapa del proceso	Contenido de gliadinas			
		5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm
PC	MSP				
		(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)
	P				
	(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)	
PO	MSP				
		(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)
	P				
	(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)	
PCA	P				
			(Negativo)	(Negativo)	(Negativo)
PCST	P				
			(Positivo)	(Positivo)	(Positivo)

ppm= partes por millón, MSP= mezcla sin procesar, P= procesada.

con 20 ppm sigue siendo considerado un producto libre de gluten (FDA 2014). Asimismo, en la PCST se detectaron gliadinas a 5, 10, 15 y 20 ppm, lo que puede atribuirse a la materia prima sémola de trigo que contiene altas cantidades de gluten.

10. Análisis sensorial

En la **Figura 31** se presentan los resultados obtenidos en el estudio de aceptabilidad sensorial de las pastas alimenticias, así como las fotografías de los diferentes productos evaluados. En el análisis de aceptabilidad general, se observó que 79% de los panelistas seleccionaron valores de la escala hedónica ≥ 5 en la PO (12.57% de garbanzo). Este valor es ligeramente menor al obtenido en la pasta comercial elaborada con arroz (PCA, 83.3%), y es mayor que el valor PC (63.3%), que fue elaborada con un 100% de arroz quebrado. En el análisis de comparación de medias, se observaron diferencias significativas (LSD, $p < 0.05$) entre los tres productos evaluados, donde PCA obtuvo la mayor aceptación por parte de los panelistas, seguido muy de cerca por la PO. Los resultados indican que la adición de 12.57% de garbanzo extrudido a la pasta libre de gluten permitió mejorar la aceptabilidad de dicho producto.

En el análisis por atributos (**Figura 32A**), la PO presentó la mayor aceptabilidad para el parámetro de color, donde el 93.3% de los evaluadores eligió valores ≥ 5 , presentando diferencia significativa (LSD, $p < 0.05$) en comparación con la PC (87.5%) y PCA (84.5%). Por otro lado, para el atributo de sabor (**Figura 32B**), PO (84.2%) y PCA (84.4%) presentaron altos valores de aceptación por los panelistas, sin presentar diferencia significativa (LSD, $p > 0.05$) entre ellos, pero sí se presentó diferencia significativa (LSD, $p < 0.05$) con PC (67.5 %). Asimismo, para el análisis de textura

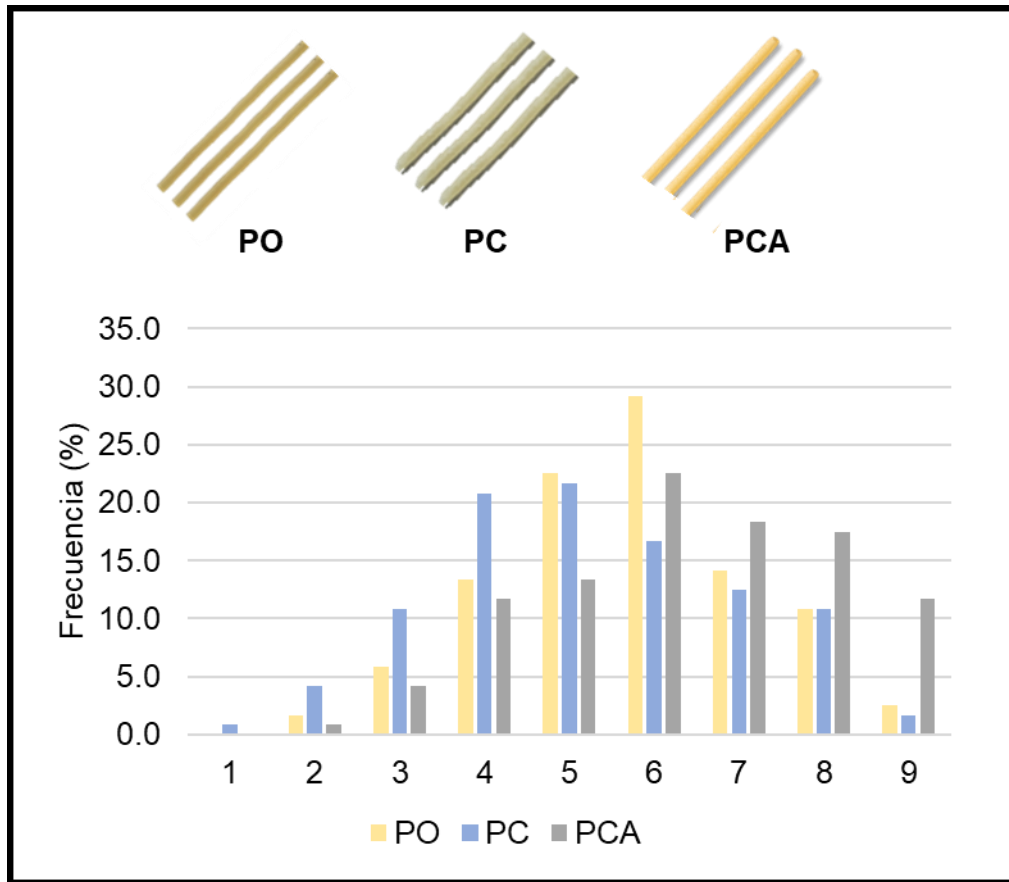


Figura 31. Análisis de frecuencia de la prueba de aceptabilidad general (1= me disgusta extremadamente, 2= me disgusta mucho, 3= me disgusta moderadamente, 4= me disgusta, 5= ni me gusta ni me disgusta, 6= me gusta, 7= me gusta moderadamente, 8= me gusta mucho, 9= me gusta extremadamente) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz quebrado y garbanzo extrudido; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial a base de arroz).

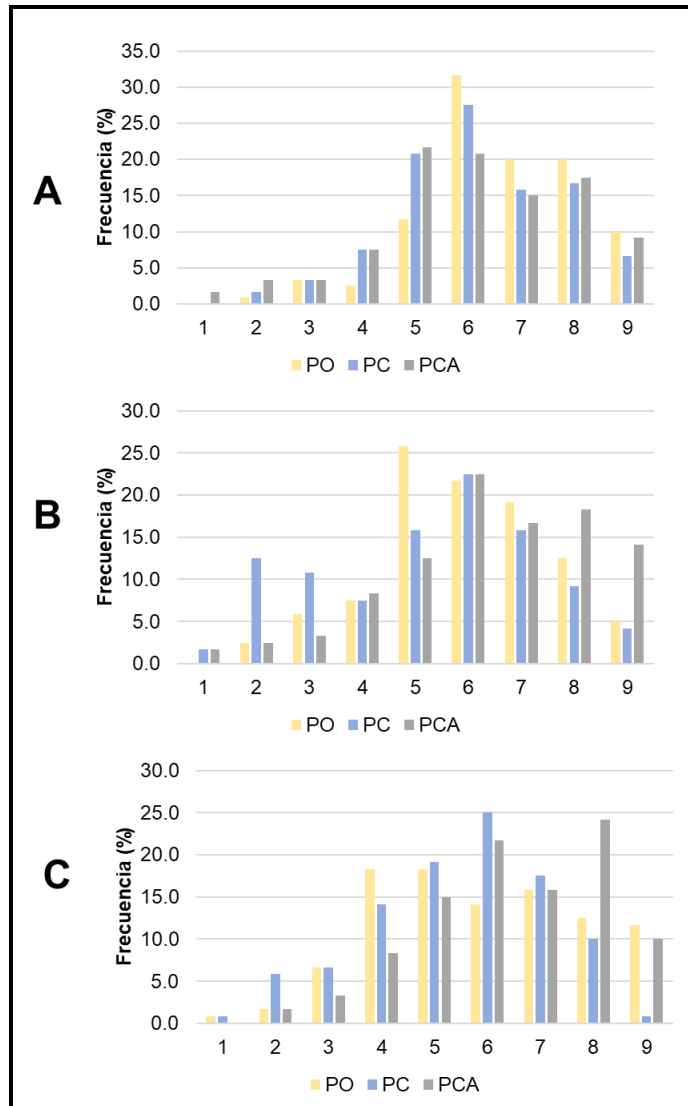


Figura 32. Análisis de frecuencia de la prueba de aceptabilidad por atributos (**A**= color, **B**= sabor, **C**= textura) (1= me disgusta extremadamente, 2= me disgusta mucho, 3= me disgusta moderadamente, 4= me disgusta, 5= ni me gusta ni me disgusta, 6= me gusta, 7= me gusta moderadamente, 8= me gusta mucho, 9= me gusta extremadamente) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz quebrado y garbanzo extrudido; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial a base de arroz).

(Figura 32C) no se presentó diferencia significativa (LSD, $p < 0.05$) entre la PO (72.5%) y PC (72.5%), pero sí se presentó diferencia con PCA (86.7%), donde este producto comercial mostró la mayor aceptación para este atributo.

En el análisis de probabilidad de compra (**Figura 33**), las tres pastas presentaron valores positivos, donde se observó que el 79.5% de los panelistas indicaron que probablemente comprarían la PO, el 80.83 % la PC y el 81.67 % la PCA, no presentándose diferencia significativa (LSD, $p > 0.05$) entre las pastas. Este resultado indica que la PO podría ser comercializada y aceptada para su compra por el público consumidor, igual que la pasta comercial de arroz (PCA), con la eventual ventaja de los beneficios en la salud que podría presentar el consumo de la PO, por la adición de garbanzo extrudido en su composición, ya que es una leguminosa con alto valor nutrimental/nutracéutico.

Los resultados generales obtenidos en el estudio de aceptabilidad sensorial indicaron que la PCA presentó la más alta aceptabilidad general y la textura. Esto podría deberse al hecho de que algunos productos comerciales pueden contener aditivos en sus formulaciones, lo que, probablemente, podría resaltar sabores y texturas, principalmente (Ruiz-Armenta y col 2018). Por otro lado, la PO presentó la mayor aceptabilidad para el atributo de color posiblemente debido a la atractiva coloración amarilla-naranja del garbanzo, y no se presentó diferencia significativa (LSD, $p > 0.05$) entre PO y PCA para el atributo sabor y probabilidad de compra.

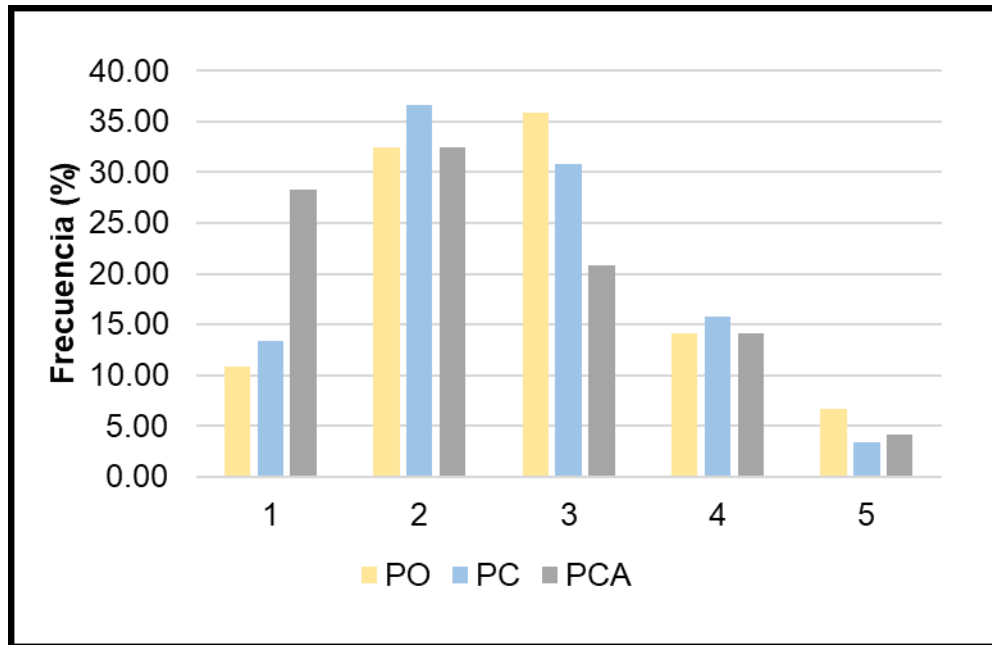


Figura 33. Análisis de frecuencia de la probabilidad de compra (1= si la compraría, 2= probablemente si la compraría, 3= tal vez la compraría, 4= probablemente no la compraría, 5= no la compraría) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz quebrado y garbanzo extrudido; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial a base de arroz).

IX. CONCLUSIONES

1. Las características presentadas por las materias primas (composición química y propiedades fisicoquímicas) indicaron que estas pueden ser utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten con propiedades adecuadas, lo cual se comprobó en el presente estudio.
2. Los factores independientes temperatura de extrusión (TE) y contenido de harina de garbanzo extrudido (CG) fueron los que presentaron mayor efecto significativo ($p < 0.05$) sobre las diferentes características físicas y fisicoquímicas.
3. Las pastas alimenticias obtenidas presentaron valores adecuados en los parámetros de cocción (tiempo de cocción (TC), aumento de peso (AP), aumento de volumen (AV) y pérdidas de sólidos por cocción (PSC)), siendo los valores parecidos a los presentados por productos comerciales.
4. El factor independiente harina de garbanzo extrudido (HG) fue el que presentó mayor efecto sobre los parámetros de color, características fitoquímicas y funcionales (carotenoides totales, fenoles totales y actividad antioxidante).
5. Se obtuvieron las condiciones óptimas de procesamiento (TE=117 °C, VT=134.4 rpm y CG=12.57 %) mediante el método numérico, los valores experimentales obtenidos en la validación fueron similares a los valores predichos por los modelos.
6. Los análisis microestructurales sugieren que las pastas extrudidas presentaron modificaciones debido, principalmente, a las condiciones de procesamiento y a la modificación de los gránulos de almidón, la cual se llevó a cabo de manera parcial.

7. En los análisis nutrimentales de las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento se obtuvo que estas presentaron valores adecuados de digestibilidad proteínica *in vitro*, perfil de aminoácidos, perfil de minerales, y fibra dietaria, esto debido a las materias primas utilizadas para su producción, y a las modificaciones que favorecieron el incremento de algunas de estas propiedades. Se obtuvieron pastas alimenticias con un bajo IG (<45 %) y aptas para personas con enfermedad celiaca al no presentar contenido de gliadinas.
8. Se obtuvieron pastas alimenticias con un mejor contenido de compuestos bioactivos (compuestos fenólicos, carotenoides) y actividad antioxidante que pastas comerciales, debido al importante aporte de estos compuestos por la materia prima harina de garbanzo extrudido.
9. En el análisis sensorial, la pasta óptima mostró una buena aceptabilidad general (79%) por parte de los consumidores, siendo esta cercana a la pasta comercial de arroz (83.3%). Además, la pasta óptima presentó la mayor aceptabilidad en el atributo de color, obteniendo valores de aceptabilidad para el atributo de sabor y para la probabilidad de compra estadísticamente similares a los presentados por una pasta comercial elaborada con arroz.
10. Es posible producir pastas alimenticias extrudidas libres de gluten utilizando como materias primas harinas de arroz quebrado y garbanzo con aceptables propiedades fisicoquímicas, fitoquímicas, antioxidantes, nutrimentales y sensoriales, cuyo consumo podría tener beneficios en la salud de los consumidores.

X. BIBLIOGRAFÍA

- AACC. 1990. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 9a Ed. March St. Paul. Minnesota U.S.A
- AACC. 2010. Approved Methods of Analysis of the American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota.
- Adelakun OE, Kudanga T, Parker A, Green IR, Roes-Hill ML, Burton SGJ. 2012. Laccase-catalyzed dimerization of ferulic acid amplifies antioxidant activity. Journal of molecular catalysis B: enzymatic 74: 29-35.
- Adom KF, Liu RH. 2002. Antioxidant activity of grains. Journal of Agricultural and Food Chemistry 50:6182-6187. <https://doi.org/10.1021/jf0205099>
- Akhtar J, Malik S, Alam MA, Student MT, Allahabad S. 2015. Extrusion technology used for novel Foods Production. International Journal of engineering development and research 3:1–7.
- Amarowicz R, Pegg RB. 2017. The Potential Protective Effects of Phenolic Compounds against Low-density Lipoprotein Oxidation. Current pharmaceutical design 23(19):2754-2766. doi: 10.2174/1381612823666170329142936
- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL. 19th ed. Association of Official Analytical Chemists the Association. Gaithersburg, Maryland, USA.
- Apáez-Barrios M, Escalante-Estrada JAS, Apáez-Barrios P, Álvarez-Hernandez JC. 2020. Production, growth and nutritional quality of chickpea depending on

nitrogen and phosphorus. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 11(6):1273-1284.

Arribas C, Cabellos B, Cuadrado C, Guillamón E, Pedrosa MM. 2020. Cooking effect on the bioactive compounds, texture, and color properties of cold-extruded rice/bean-based pasta supplemented with whole carob fruit. *Foods* 9(4):415. <https://doi.org/10.3390/foods9040415>

Atkinson FS, Brand-Miller JC, Foster-Powell K, Buyken AE, Goletzke J. 2021. International tables of glycemic index and glycemic load values 2021: a systematic review. *The American journal of clinical nutrition*, 114(5): 1625-1632.

Avendaño EJF, García LMO, Marriaga EER 2017. Evaluación nutricional y sensorial de pastas alimenticias elaboradas con semola de trigo (*Triticum durum*) y harina de ahuyama (*Cucurbita máxima duch*). *Alimentos Hoy* 25(42):3-17.

Badui S. 1997. *Diccionario de Tecnología de los alimentos*. 2da. Reimpresión. DF México: Alhambra Mexicana. 300 p.

Barbiroli A, Bonomi F, Casiraghi MC, Iametti S, Pagani MA, Marti A. 2013. Process conditions affect starch structure and its interactions with proteins in rice pasta. *Carbohydrate Polymers* 92(2):1865–1872. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.047>

Biesiekierski JR. 2017. ¿Qué es el gluten?. *Revista de Gastroenterología y Hepatología* 32:78–81. doi:10.1111/jgh.13703

- Bordoloi R, Ganguly S. 2014. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian journal of scientific research and technology* 2:1-3.
- Bouasla A, Wójtowicz A, Zidoune MN. 2017. Gluten-free precooked rice pasta enriched with legumes flours: Physical properties, texture, sensory attributes and microstructure. *LWT* 75:569–577. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.005>
- Brennan MA, Menard C, Roudaut G, Brennan C. 2012. Amaranth, millet and buckwheat flours affect the physical properties of extruded breakfast cereals and modulates their potential glycaemic impact. *Starch* 64:392–98. doi:10.1002/star.201100150.
- Calle IDL, Ros G, Peñalver R, Nieto G. 2020. Celiac disease: causes, pathology, and nutritional assessment of gluten-free diet. A review. *Nutricion hospitalaria* 37(5):1043-1051. <https://doi.org/10.20960/nh.02913>
- Cárabez-Trejo A, Paredes-López O, Reyes-Moreno C. 1989. Microstructure of cotyledon cells from hard-to-cook common beans. *Starch–Stärke* 41(9):335-339. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb00677.x>
- Céspedes JC. 2020. Elaboración de un sistema de inocuidad dentro del proceso de producción de pastas libres de gluten. [Tesis de maestría]. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón. Disponible de: DDigital.
- Chafla-Cando WG. 2022. Caracterización de la harina de arroz (*Oryza sativa*) para su utilización en la industria de la panificación. [Tesis de licenciatura]. Riobamba, Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo. 51 p. Disponible de: Dspace.

Chávez-Ontiveros J, Reyes-Moreno C, Ramírez-Torres GI, Figueroa-Salcido OG, Arámburo-Gálvez JG, Montoya-Rodríguez A, Ontiveros N, Cuevas-Rodríguez EO. 2022. Extrusion improves the antihypertensive potential of a kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein hydrolysate. *Foods* 11(17):2562. <https://doi.org/10.3390/foods11172562>

Codex Stan. 1995. Norma Codex para el arroz. Codex Standard 198:7.

Costa-Mugica A, Batista-Gonzalez AE, Diadelis-Mondejar, Soto-López Y, Brito-Navarro V, Vázquez A, Dieter-Brömme, Zaldívar-Muñoz C, Vidal-Novoa A, Oliveira, Silva A, Mancini-Filho J. 2012. Inhibition of LDL-oxidation and antioxidant properties related to polyphenol content of hydrophilic fractions from seaweed *Halimeda Incrassata* (Ellis) Lamouroux. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* 48(1). <https://doi.org/10.1590/S1984-82502012000100004>

Da Silva EMM, Ascheri JLR, Ascheri DPR. 2016. Quality assessment of gluten-free pasta prepared with a brown rice and corn meal blend via thermoplastic extrusion. *Food Science and Technology* 68:698-706. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.067>

De Almeida CGE, Queiroz-Monici KS, Pissini MRS; Costa OA. 2006. Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. *Food chemistry* 94:327-330.

Degiovanni V, Martínez C, Motta F. 2010. Producción Eco-eficiente del Arroz en América Latina. Tomo I. Centro Internacional de Agricultura Tropical 365:487.

- Detchewa P, Thongngam M, Jane JL, Naivikul O. 2016. Preparation of gluten-free rice spaghetti with soy protein isolate using twin-screw extrusion. *Journal of Food Science and Technology* 53(9):3485–3494. doi:10.1007/s13197-016-2323-8
- El-Biale N, Saad AM, El-Didamony MI, Zahra G. 2017. Influence of Extrusion-Cooking Conditions on Corn Pasta Quality. *European journal of engineering and technology research* 2(3):24-29. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2017.2.3.301>.
- Estévez V, Araya M. 2016. La dieta sin gluten y los alimentos libres de gluten. *Revista chilena de nutrición* 43(4):428-433. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000400014>
- FAO. 2013. Report on dietary protein quality evaluation in human nutrition, paper no. 92: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO.
- FAO/WHO. 2003. World Health Organization. Diet, Nutrition and the Prevention of Chronic Diseases. Report of a Joint WHO/FAO Expert Consultation. WHO Technical Report Series no.916. Geneva: WHO.
- FAOSTAT. 2023. Datos sobre alimentación y agricultura: Organización de las naciones unidad para la alimentación y la agricultura. Disponible de: <https://www.fao.org/faostat/es/#home>. Consultado el 15 de septiembre de 2023.
- FDA. 2014. Questions and answers: gluten-free food labeling final rule. *Food and Drug Administration*. Disponible de: <http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/> . Consultado el 20 de septiembre del 2023.

- Feijoo JLC, Mora EOM, Calderón CES, Torres RD. 2018. Pruebas de cocción de pastas alimenticias elaboradas con harina de trigo - almidón de banano. *Cumbres* 4(1):63–73. <https://doi.org/10.48190/cumbres.v4n1a6>
- Feizollahi E, Mirmoghtadaie L, Mohammadifar MA, Jazaeri S, Hadaegh H, Nazari B, Lalegani S. 2018. Sensory, digestion, and texture quality of commercial gluten-free bread: Impact of broken rice flour type. *Journal of Texture Studies*. 49(4): 395-403. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12326>
- Fellows P. 2012. Extrusion of foods. *Practical Action Technology Challenging Poverty*.
- Foschia M, Horstmann S, Arendt EK, Zannini E. 2016. Nutritional therapy - Facing the gap between coeliac disease and gluten-free food. *International journal Food Microbiology* 19(239):113-124. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2016.06.014.
- Foschia M, Peressini D, Sensidoni A, Brennan CS. 2013. The effects of dietary fibre addition on the quality of common cereal products. *Journal of cereal science* 58(2):216-227. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.05.010>
- Franquet Bernis J, Borrás Pámies C. (2004). *Variedades y Mejora del Arroz (Oryza sativa L)*. Edit. CopyRapid, Tortosa. Barcelona, España. 284 p.
- García Almeida J, García Alemán J, Martínez B, Vilchez F y S Maraver. 2012. Enfermedad celiaca, Dieta controlada en Glutén. En: Román DL, Bellido D, García P. *Dietoterapia, nutrición clínica y metabolismo*. 2ª Ed. Madrid: España. p 247-262.
- García MA, Martino MN, and Zaritzky NE. 2000. Microstructural characterization of plasticized starch-based films. *Starch-Stärke* 52(4):118-124.

- Garcia-Valle DE, Belo-Pérez LA, Agama-Acevedo E, Alvarez-Ramirez J. 2021. Structural characteristics and in vitro starch digestibility of pasta made with durum wheat semolina and chickpea flour. *LWT*. 145:111347. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111347>
- Gharibzahedi SMT, Jafari SM. 2017. The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. *Trends in Food Science and Technology*,62:119-132.<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.017>
- Gil HA. 2010. Tratado de nutrición. Composición y calidad nutritiva de los alimentos. 2ª ed. D.F. México: Medica Panamericana. 812p.
- Gil-Martínez A. 2010. Preelaboración y conversación de alimentos. Madrid: Ediciones Akal.
- Goñi I, Valentin-Gamazo C. 2003. Chickpea flour ingredient slows glycemic response to pasta in healthy volunteers. *Food chemistry* 81(2003):511-515. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00480-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00480-6)
- Granito M, Pérez S, Valero Y. 2014. Quality of cooking, acceptability and glycemic index of enriched pasta with legumes. *Revista chilena de nutrición* 41(4):425-432. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182014000400012>
- Havva TB, Kumcuoglu S, Vatanserver M, Tavman S. 2020. Thermal and pasting properties of Quinoa—Wheat flour blends and their effects on production of extruded instant noodles. *Journal of Cereal Science* 97:10312. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103120>

- Hernández-Nava RG, Bello-Pérez LA, Martín-Martínez E, Hernández-Sánchez H, Mora-Escobedo R. 2011. Effect of extrusion cooking on the functional properties and starch components of lentil/banana blends: Response surface analysis *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10(3):409-419.
- Herrera-Cazares LA, Luzardo-Ocampo I, Ramírez-Jiménez AK, Gutiérrez-Urbe JA, Campos-Vega R, Gaytán-Martínez M. 2021. Influence of extrusion process on the release of phenolic compounds from mango (*Mangifera indica* L.) bagasse-added confections and evaluation of their bioaccessibility, intestinal permeability, and antioxidant capacity. *Food Research International* 148:110591. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110591>
- Hoseney RC. 1999. *Principles of Cereal Science and Technology*, pp. 32-65, 269-274. St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists.
- Hou GG, Otsubo S, Okusu H, Shen L. 2010. Noodle processing technology. *Science, technology and processing* 99–120. doi: 10.1002/9780470634370
- Hou Y, Yin Y, Wu G. 2015. Dietary essentiality of “nutritionally non-essential amino acids” for animals and humans. *Experimental Biology and Medicine* 240(8):997–1007. doi:10.1177/1535370215587913
- Hulse J, Van-der P. 1991. Nature, composition, and utilization of food legumes. In *Expanding the Production and Use of Cool Season Food Legumes: A global perspective of persistent constraints and of opportunities and strategies for further increasing the productivity and use of pea, lentil, faba bean, chickpea and*

- grasspea in different farming systems (pp. 77-97). Dordrecht: Springer Netherlands.
- IPO. 2023. Discover the last report on world pasta consumption & production. Roma:Italia. International Pasta Organisation (IPO). Disponible de: <http://www.internationalpasta.org/>. Consultado el 01 de septiembre de 2023.
- Iqbal A, Khalil A, Ateeq N, Sayyar MK. 2006. Nutritional quality of important food legumes. *food chemistry* 97:331-335. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.011>
- Jalgaonkar K, Jha SK, Mahawar MK, Yadav DN. 2019. Pearl millet based pasta: optimization of extrusion process through response surface methodology. *Journal of Food science and technology* 56:1134–1144. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03574-3>
- Jiménez-Vera V, Aguilar-Martinez D, Martínez-Manrique E. 2018. Elaboración de una pasta de sémola tipo Fettuccine enriquecida con chía blanca (*Salvia hispanica* L.) con alto valor nutrimental. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* 3:1-6.
- Jukanti A, Gaur P, Gowda C, Chibbar R. 2012. Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *British Journal of Nutrition* 108(11):11-26. [doi:10.1017/S0007114512000797](https://doi.org/10.1017/S0007114512000797)
- Juliano O. 1994. El arroz en la nutrición humana. Instituto internacional de investigación sobre el arroz (FAO). Roma. 53p.

- Karlin S, Karlin E, Meiller T, Bashirelahi N. 2016. Dental and Oral Considerations in Pediatric Celiac Disease. *Journal of dentistry for children* 83(2):67-70.
- Kaur M, Sandhu KS. 2016. Sweet potato flour and starch. In *Tropical Roots and Tubers: Production, Processing and Technology*, IFST Advances in Food Science 479-506. <https://doi.org/10.1002/9781118992739.ch11a>
- Kaur R, Prasad K. 2021. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (*Cicer arietinum*) - A review. *Trends in Food Science and Technology* 109:448-463. doi:10.1016/j.tifs.2021.01.044
- Kim YK, Guo Q, Packer L. 2002. Free radical scavenging activity of red ginseng aqueous extracts. *Toxicology* 172(2):149-156. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(01\)00585-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(01)00585-6)
- Koch W. 2019. Dietary polyphenols-important non-nutrients in the prevention of chronic noncommunicable diseases. A systematic review. *nutrients* 11:1039. <https://doi.org/10.3390/nu11051039>
- Labrada OB, Reyes CV, Sánchez HNS, Otero JAS. 2020. Enfermedad Celíaca en el adulto. Un reto en el nuevo milenio. *Multimed* 24(4).
- Laishram B, Das AB. 2017. Effect of thermal pretreatments on physical, phytochemical, and antioxidant properties of black rice pasta. *Journal of Food Process Engineering* 40(5):12553. doi:10.1111/jfpe.12553
- Lezcano E. 2016. Pastas alimenticias. *Alimentos argentinos* (70):41-48.

- López-Padrón I, Martínez-González L, Pérez-Domínguez G, Reyes-Guerrero, Y, Núñez-Vázquez M, Cabrera-Rodríguez, JA. 2021. Uso de bioestimulantes en el cultivo del garbanzo. *Cultivos Tropicales*, 42(4).
- Loubes M. 2015. Molienda seca y húmeda de arroz en molino planetario. Cinética de la molienda, efecto de las condiciones de molienda en las propiedades funcionales de la harina y del almidón y diseño de mezclas para pastas sin gluten [Tesis de Doctorado]. Buenos Aires, Argentina: Universidad De Buenos Aires. 257 p. Disponible de: Biblioteca digital exactas.
- Loy S, Simón R, Delgado R. 2002. VIMANG, un potencial protector de la peroxidación lipídica en lipoproteínas de baja densidad. *Revista Cubana de Investigación Biomédica* 21(3):167– 170.
- Martínez ME, Silverio CS, Criollo FJ, Díaz TR. 2017. Cooking test of food pasta preaped with wheat flour - banana starch. *Revista Cumbres* 4(1).
- Martínez ML, Marín MA, Gili RD, Penci MC, Ribotta PD. 2017. Effect of defatted almond flour on cooking, chemical and sensorial properties of gluten-free fresh pasta. *International Journal of Food Science & Technology* 52(10):2148-2155. doi:10.1111/ijfs.13493
- Martínez-Flores H E. 1997. Estudios bioquímicos y nutricionales en tortilla de maíz elaboradas por un proceso de extrusión. [Tesis de doctorado]. Ciudad de México, México: Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN). Departamento de Biotecnología y Bioingeniería.

- Martínez-Valverde I, Periago MJ, Ros-Gaspar. 2000. Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. Archivos latinoamericanos de nutrición, 50(1):5-18.
- Mataix-Verdú J. 2005. Nutrición para educadores. 2ª edición ed. España: Díaz de Santos.
- McClure J. 2022. Manipulating Starch Digestibility by Influencing Molecular and Microscale Starch Structure in 3rd Generation Extruded Snack Foods. . [Tesis de Doctorado]. Anglia Oriental. The University of East Anglia. 221 p. Disponible en: ueaeprints
- Menis-Henrique MEC, Scarton M, Piran MVF, y Clerici MTPS. 2020. Cereal Fiber: extrusion modifications for food industry. Current Opinion in Food Science 33:141-148. doi:10.1016/j.cofs.2020.05.001
- Mokni-Ghribi A, Sila A, Maklouf-Gafsi I, Blecker C, Danthine S, Attia H, Besbes S. 2015. Structural, functional, and ACE inhibitory properties of water-soluble polysaccharides from chickpea flours. International Journal of Biological Macromolecules 75:276–282. doi:10.1016/j.ijbiomac.2015.01.03
- Moore J, Hao Z, Zhou K, Luther M, Costa J, Yu L. 2005. Carotenoid, tocopherol, phenolic acid, and antioxidant properties of Maryland-grown soft wheat. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53(17):6649-6657. <https://doi.org/10.1021/jf050481b>
- Moreno Aznar M. 2019. Efecto de la incorporación de fenogreco en las propiedades reológicas y estructurales de formulaciones de pasta fresca sin gluten [Tesis de

Doctorado]. Valencia, España: Universitat Politècnica de València. 129 p.
Disponible de: RiuNet.

Mościcki L, Mitrus M, Wójtowicz A. 2007. Extrusion technique in the agri-food industry. State Agricultural and Forestry Publishing House.

Nagataki A, Tomita H, Himeda Y, Takemori T, Fukuoka M. 2018. A quantification method of retrogradation for cooked rice based on a single isolated peak in X-ray diffraction. *Journal of cereal science* 79:80-85. doi:10.1016/j.jcs.2017.09.013

Nara S, Mori A, Komiya T. 1978. Study on relative crystallinity of moist potato starch. *Starch–Stärke* 30(4):111-114. <https://doi.org/10.1002/star.19780300403>

Niu M, Hou, GG, Lee B, Chen Z. 2014. Effects of fine grinding of millfeeds on the quality attributes of reconstituted whole-wheat flour and its raw noodle products. *LWT– Food Science and technology* 57: 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.01.021>

Nosworthy MG, Medina G, Franczyk AJ, Neufeld J, Appah P, Utioh A, House JD. 2018. Effect of Processing on the In Vitro and In Vivo Protein Quality of Beans (*Phaseolus vulgaris* and *Vicia Faba*). *Nutrients*, 10(6): 671. doi:10.3390/nu10060671

OMS. 2013. Organización Mundial de la Salud. Ingesta de sodio en adultos y niños. Departamento de Nutrición para la Salud y el Desarrollo. Disponible en <http://www.who.int/nutrition>. Consultado el 20 de septiembre de 2023.

- Ortak M, Caltinoglu C, Sensoy I, Karakaya S, Mert B. 2017. Changes in functional properties and in vitro bioaccessibilities of β -carotene and lutein after extrusion processing. *Journal of food science and technology*, 54: 3543-3551.
- Ortega-Micó A. 2016. Variación del perfil nutricional en pastas alimenticias frescas con el empleo de harina de chufa e hidrocoloides en su formulación. [Tesis de doctorado] Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Ortiz-Aragón M, Barona-Trujillo DS. 2018. Procesamiento por extrusión de mezclas de maíz y arroz (harinas y salvados): efecto del nivel de contenido de salvados sobre las características físicas de los extruidos. [Tesis de licenciatura]. Cali, Colombia: Universidad del valle. 157 p. Disponible de: biblioteca digital Univalle.
- Ortiz-Robles JI. 1998. Caracterización química y física de la corteza de semilla de mango variedad Kent. [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.
- Padalino L, Mastromatteo M, Lecce L, Spinelli S, Conte A, Alessandro NM. 2015. Optimization and characterization of gluten-free spaghetti enriched with chickpea flour. *International Journal Food Sciences and Nutrition* 66(2):148-158. <https://doi.org/10.3109/09637486.2014.959897>
- Panisello J. 2004. Las 100 preguntas que siempre quiso hacer: Mitos y verdades en torno a la alimentación. Editorial Glosa, S.L. España. 166 p.
- Park J, Oh SK, Chung HJ, Park HJ. 2019. Structural and physicochemical properties of native starches and non-digestible starch residues from Korean rice cultivars

with different amylose contents. Food Hydrocolloids, 105544. doi:10.1016/j.foodhyd.2019.105544

Pittaway JK, Ahuja KDK, Cehun M, Chronopoulos A, Robertson IK, Nestel PJ, Ball MJ. 2007. Dietary supplementation with chickpeas for at least 5 weeks results in small but significant reductions in serum total and low-density lipoprotein cholesterol in adult women and men. *Annals of Nutrition and Metabolism* 50(6): 512-518. <https://doi.org/10.1159/000098143>

Prosky L, Asp NG, Scheweizer TF, DeVries JW, Furda I. 1988. Determination of insoluble and soluble, and total dietary fibre in foods and food products: Interlaboratory study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 71:1017–1023

Quiñones M, Miguel M, Aleixandre A. 2012. Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*, 27(1):76-89.

Rafiq A, Sharma S, Singh B. 2017. Regression analysis of gluten-free pasta from brown rice for characterization and in vitro digestibility. *Journal of Food Processing and Preservation* 41(2):e12830. doi:10.1016/j.jcs.2017.03.001

Rathod RP, Annapure US. 2016. Effect of extrusion process on antinutritional factors and protein and starch digestibility of lentil splits. *Food Science and Technology* 66:114-123. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.028>

Riaz MN. 2010. Introduction to extruders and their principles. En: Riaz MN, *Extruders in Food Applications*. 2ª Ed. Londres, Inglaterra: Ebook. 1-24 p.

- Rico D, Canó AB, Martín-Diana AB. 2021. Pulse-cereal blend extrusion for improving the antioxidant properties of a gluten-free flour. *Molecules* 26:55-78. <https://doi.org/10.3390/molecules26185578>
- Ruiz-Armenta X A, Zazueta-Morales JDJ, Aguilar-Palazuelos E, Delgado-Nieblas CI, López-Díaz A, Camacho-Hernández IL, Martínez-Bustos F. 2018. Effect of extrusion on the carotenoid content, physical and sensory properties of snacks added with bagasse of naranjita fruit: optimization process. *CyTA-Journal of Food* 16(1):172-180.
- Sá AGA, Moreno YMF, Carciofi BAM. 2019. Food processing for the improvement of plant proteins digestibility. *Critical Reviews in Food science and nutrition* 1-20. doi:10.1080/10408398.2019.1688249
- Sęczyk Ł, Świeca M, Gawlik-Dziki U. 2016. Effect of carob (*Ceratonia siliqua* L.) flour on the antioxidant potential, nutritional quality, and sensory characteristics of fortified durum wheat pasta. *Food and Chemistry* 194:637–642.
- Sedaghat A, Shahbazian H, Rezazadeh A, Haidari F, Jahanshahi A, Latifi SM, Shirbeigi E. 2019. The effect of soy nut on serum total antioxidant, endothelial function and cardiovascular risk factors in patients with type 2 diabetes. *Diabetes and metabolic syndrome: clinical research & reviews*, 13(2):1387-1391. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2019.01.057>
- Shahidi F, Ambigaipalan P. 2015. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review. *Journal of functional foods*, 18:820-897. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018>

- Singh S, Gamlath S, Wakeling L. 2007. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology* 42(8):916-929. <https://doi.org/10.1021/jf071769z>
- Sobukola OP, Babajide JM, Ogunsade O. 2012. Effect of brewers spent grain addition and extrusion parameters on some properties of extruded yam starch-based pasta. *Journal of Food Processing and Preservation* 37(5):734–743. doi:10.1111/j.1745-4549.2012.00711.x
- Steel C, Leoro M, Schmiele M, Ferreira R, Chang Y. 2012. Thermoplastic extrusion in food processing. *Thermoplastic Elastomers* 265–284.
- Steglich T, Bernin D, Moldin A, Topgaard D, Langton M. 2015. Bran Particle Size Influence on Pasta Microstructure, Water Distribution, and Sensory Properties. *Cereal Chemistry Journal* 92(6): 617–623. doi:10.1094/cchem-03-15-0038-r
- Sun X, Yu C, Fu M, Wu D, Gao C, Feng X, Cheng W, Shen X, Tang X. 2019. Extruded whole buckwheat noodles: effects of processing variables on the degree of starch gelatinization, changes of nutritional components, cooking characteristics and in vitro starch digestibility. *Journal Food and function*. <https://doi.org/10.1039/C9FO01111K>
- Sun Y, Ye H, Hu B, Wang W, Lei S, Wang X, Zeng X. 2015. Changes in crystal structure of chickpea starch samples during processing treatments: An X-ray diffraction and starch moisture analysis study. *Carbohydrate Polymers* 121:169-174. doi:10.1016/j.carbpol.2014.12.048

- Suo X, Dall'Asta M, Giuberti G, Minucciani M, Wang Z, Vittadini E. 2022. The effect of chickpea flour and its addition levels on quality and in vitro starch digestibility of corn–rice-based gluten-free pasta, *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 73:5, 600-609. <https://doi.org/10.1080/09637486.2022.2040008>
- Torres A, Frias J, Granito M, Vidal-Valverde C. 2007. Germinated *Cajanus cajan* seeds as ingredients in pasta products: chemical, biological and sensory evaluation. *Food Chemistry* 101:202-211.
- Tosh SM, Yada S. 2010. Dietary fibres in pulse seeds and fractions: Characterization, functional attributes, and applications. *Food Research International* 43(2):450–460. doi:10.1016/j.foodres.2009.09.005
- Turpín-Saorín J. 2010. Valoración de la actividad antioxidante en sopas deshidratadas mediante los ensayos de la desoxirribosa y de la peroxidación lipídica. [Tesis de Maestría]. Murcia, España. Universidad de Murcia. 254 p. Disponible en: Digitum, biblioteca universitaria.
- Udachan I, Sahoo AK. 2017. Quality evaluation of gluten free protein rich broken rice pasta. *Food Measure* 11:1378–1385. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9516-3>
- UNAFPA. 2013. Union Des Associations De Fabricants De Pates Alimentaires. Roma: Italia. Disponible de: www.pasta-unafpa.org/. Consultado el 15 de noviembre de 2023.
- Utrilla-Coello RG, Osorio-Diaz P, Bello-Perez LA. 2007. Alternative use of chickpea flour in breadmaking: chemical composition and starch digestibility of bread. *Food*

<https://doi.org/10.1177/108201320708253>

Varela CN, Fajardo MA, Garrido BR, Alassia FR, Garrido CV, León NM, Cian RE. 2019.

Composición química y calidad proteica de fideos complementados con harina de *Porphyra columbina*. *Diaeta* 37(167):08-17.

Wang L, Duan W, Zhou S, Qian H, Zhang H, Qi X. 2017. Effect of rice bran fibre on the

quality of rice pasta. *International Journal of Food Science & Technology* 53(1):81–87. doi:10.1111/ijfs.13556

Wang WM, Klopfenstein CF, Ponte JG. 1993. Effects of twin-screw extrusion on the

physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal chemistry* 70(6):707-711.

Whitlark DB, Geurts MD, Swenson MJ. 1993. New product forecasting with a purchase

intention survey. *Journal of Business Forecasting* 12:18-21.

Wójtowicz A, Mościcki L. 2014. Influence of legume type and addition level on quality

characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *Food Science and Technology* 59(2):1175-1185. doi:10.1016/j.lwt.2014.06.010

Wójtowicz A, Oniszczyk A, Kasprzak K, Olech M, Mitrus M, Oniszczyk T. 2020.

Chemical composition and selected quality characteristics of new types of precooked wheat and spelt pasta products. *Food chemistry* 309:125673. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125673>

- Yang Y, Zhou L, Gu Y, Zhang Y, Tang J, Li, F, Chen M. 2007. Dietary chickpeas reverse visceral adiposity, dyslipidaemia and insulin resistance in rats induced by a chronic high-fat diet. *British Journal of Nutrition*, 98(4):720-726. doi:10.1017/S0007114507750870
- Yoenyongbuddhagal S, Noomhorn A. 2002. Effect of physicochemical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality. *Cereal Chemistry*. 79(4):481-85
- Zardetto S, Dalla RM. 2006. Study of the effect of lamination process on pasta by physical chemical determination and near infrared spectroscopy analysis. *Journal food engineering* 74(3):402–409. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.029>
- Zarzycki P, Sykut-Domańska E, obota A, Teterycz D, Krawęcka A, Blicharz-Kania A, Zdybel B. 2020. Flaxseed Enriched Pasta—Chemical Composition and Cooking Quality. *Foods* 9(4):404. <https://doi.org/10.3390/foods9040404>
- Zhang W, Liu S, Wang Y, Zheng L, Liu F, Han X, Wan J. 2010. A study of the in vitro protein digestibility of indica and japonica cultivars. *Food Chemistry*, 122(4): 1199–1204. doi:10.1016/j.foodchem.2010.03.117
- Zhu LJ, Liu QQ, Wilson JD, Gu MH, Shi YC. 2011. Digestibility and physicochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.) flours and starches differing in amylose content. *Carbohydrate Polymers* 86(4):1751-1759. doi:10.1016/j.carbpol.2011.07.017

ABREVIATURAS

Abreviatura	Descripción
ABTS	ácido 2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico
AAOx	Actividad antioxidante
AP	Aumento de peso
AV	Aumento de volumen
b.s.	Base seca
CT	Carotenoides totales
Cm	Centímetros
CF	Compuestos fenólicos
CFT	Compuestos fenólicos totales
CFLib	Compuestos fenólicos libres
CFLig	Compuestos fenólicos ligados
CG	Contenido de harina de garbanzo extrudido
DA	Densidad aparente
DPIV	Digestibilidad proteínica in vitro
DPPH	2,2-difenil-1-picrilhidracilo
EAG	Equivalentes de ácido gálico
ET	Equivalentes de trolox
FDI	Fibra dietaria insoluble
FDS	Fibra dietaria soluble
FDT	Fibra dietaria total
G	Gramos

g.a.a.	Gramos de agua absorbida
g.s.s.	Gramos de solido seco
HAQ	Harina de arroz quebrado
HG	Harina de garbanzo
IAA	Índice de absorción en agua
IE	Índice de expansión
ISA	Índice de solubilidad en agua
IG	Índice glicémico
Lib	Extractos libres
Lig	Extractos ligados
LDL	Lipoproteínas de baja densidad
Mg	Microgramos
Mg	Miligramos
Min	Minutos
Ppm	Partes por millón
PCA	Pasta comercial de arroz
PCST	Pasta comercial de sémola de trigo
PC	Pasta control
PO	Pasta optima
PSPC	Pérdidas de sólidos por cocción
%	Porcentaje
Rpm	Revoluciones por minuto
S	Segundo

TE	Temperatura de extrusión
TC	Tiempo de cocción
VT	Velocidad de tornillo