



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

**Efecto de las condiciones de extrusión y de la adición de harina de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) sobre propiedades nutrimentales y nutracéuticas de pastas alimenticias libres de gluten, a base de arroz quebrado**

**TESIS**

Que presenta:

**MC. YAZMÍN ALEJANDRA CASTRO MONTOYA**

Para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIA**  
**Y**  
**TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Directores:

**DR. JOSÉ DE JESÚS ZAZUETA MORALES**  
**DRA. NOELIA JACOBO VALENZUELA**

**Culiacán Rosales, Sinaloa, México, octubre 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 **“Efecto de las condiciones de extrusión y de la adición de harina de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) sobre propiedades nutrimentales y nutracéuticas de pastas alimenticias libres de gluten, a base de arroz quebrado”**, se realizó en los Laboratorios de Procesos Térmicos, Análisis Funcionales y Caracterización Físicoquímica y Reológica los cuales pertenecen al Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas, de la Universidad Autónoma de Sinaloa. El trabajo tuvo la dirección del Dr. José de Jesús Zazueta Morales y la Dra. Noelia Jacobo Valenzuela, además de contar con la asesoría del Dr. Carlos Iván Delgado Nieblas, la Dra. Xóchitl Ariadna Ruiz Armenta y el Dr. José Basilio Heredia (Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD)). El proyecto recibió financiamiento del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI, PRO\_A7\_019), de la Universidad Autónoma de Sinaloa. El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) proporcionó beca para estudios de Doctorado de Yazmín Alejandra Castro Montoya.



# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**

## **CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa el día 13 del mes de septiembre del año 2024, la que suscribe M.C. Yazmín Alejandra Castro Montoya alumna del Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos con número de cuenta 1667451-0, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José de Jesús Zazueta Morales y Dra. Noelia Jacobo Valenzuela y cede los derechos del trabajo titulado “Efecto de las condiciones de extrusión y de la adición de harina de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) sobre propiedades nutrimentales y nutracéuticas de pastas alimenticias libres de gluten, a base de arroz quebrado” a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**M.C. Yazmín Alejandra Castro Montoya**

Yazmín A. Castro M.

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a **Dios** por haberme dado vida y salud a lo largo de este tiempo para poder cumplir una meta más.

Con mucho amor y cariño le doy gracias a mis papás, **Gris y Pascual**, por su apoyo incondicional en todo momento, por ser mis mayores cómplices, por siempre creer en mí y por simplemente darme lo mejor y consentirme a lo largo de mi vida. Gracias, gracias por todo.

A mis hermanos **Claudia y Gonzalo**, muchísimas gracias por jamás dejarme sola y por su infinita disposición para ayudarme en cualquier cosa.

A mi esposo **Martín**, por ser mi porrista número uno, por siempre creer en mí, por siempre sacarme una sonrisa, por siempre ser mi apoyo en cualquier situación y mi mayor soporte. Mil gracias.

A mis directores de tesis, **Dr. José de Jesús Zazueta Morales y Dra. Noelia Jacobo Valenzuela**, gracias por darme la oportunidad de integrarme en su grupo de trabajo, por sus enseñanzas y por su disposición para mejorar el proyecto.

A mis asesores de tesis **Dr. Carlos Iván Delgado Nieblas, Dra. Xóchitl Ariadna Ruiz Armenta y Dr. José Basilio Heredia** muchas gracias por todo su aporte al proyecto, por siempre escuchar cada una de mis dudas y por toda su paciencia.

A mis compañeros de laboratorio **Samuel, Fredy, Marina y Milton**, muchas gracias por hacer más amenos los días de laboratorio y de manera muy especial a **Samuel**, por su amistad y por toda su gran ayuda a lo largo de este proyecto.

A la **Facultad de Ciencias Químicas Biológicas** y al **Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos** por permitirme realizar esta bonita investigación.

A **CONAHCYT** por el apoyo económico otorgado.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xii
I. RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II. INTRODUCCIÓN	5
III. REVISIÓN DE LITERATURA	8
A. PASTAS ALIMENTICIAS	8
1. Historia	10
2. Clasificación	10
3. Producción y consumo de pastas	11
4. Composición química de pastas alimenticias	11
5. Pastas como alimentos funcionales	13
6. Pastas libres de gluten	14
B. ENFERMEDAD CELÍACA	17
1. Generalidades	17
2. Déficit nutricional	17
3. Tratamiento: dieta libre de gluten	18
4. Implicaciones de la dieta libre de gluten	20
C. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA ELABORACIÓN DE PASTAS ALIMENTICIAS	21
1. Arroz ( <i>Oryza sativa</i> L.)	21
a. Aspectos generales	21
b. Producción de arroz	24
c. Composición química y aspectos nutricionales	24
2. Nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> L.)	28
a. Aspectos generales	28
b. Producción de nopal	29
c. Composición química y aspectos nutricionales	29
d. Compuestos bioactivos y propiedades nutraceuticas	32
D. TECNOLOGIA DE EXTRUSIÓN	37
1. Generalidades	37
2. Valor nutrimental de los productos extrudidos	39
3. Proceso de elaboración de pastas libres de gluten	39
4. Investigaciones recientes de pastas alimenticias libres de gluten elaboradas por extrusión	41
IV. JUSTIFICACIÓN	45

V. HIPÓTESIS	46
VI. OBJETIVOS	47
A. OBJETIVO GENERAL	47
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	47
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	49
A. MATERIALES	49
1. Materias primas	49
B. MÉTODOS	49
1. Proceso de extrusión	49
a. Obtención de pastas alimenticias	49
2. Métodos químicos	50
a. Composición proximal	50
3. Métodos fisicoquímicos	50
a. Índice de absorción de agua (IAA)	50
b. Índice de solubilidad en agua (ISA)	52
c. Parámetro de color ( $\Delta E$ )	52
4. Propiedades de cocción	53
a. Tiempo de cocción (TC)	53
b. Aumento de peso (AP)	53
c. Aumento de volumen (AV)	54
d. Pérdidas de sólidos por cocción (PSC)	54
5. Métodos fitoquímicos y funcionales	54
a. Clorofilas totales	54
b. Extracción de fitoquímicos	55
1) Extracto de fitoquímicos libres	55
2) Extracto de fitoquímicos ligados	55
c. Compuestos fenólicos	56
1) Preparación de la curva de calibración	56
2) Determinación del contenido de compuestos fenólicos libres, ligados y totales	56
d. Determinación de actividad antioxidante ABTS	57
1) Extracción de la muestra	57
2) Medición de la actividad antioxidante	57
e. Determinación de la actividad antioxidante DPPH	58
1) Extracción de la muestra	58
2) Curva de calibración	58
3) Medición de la actividad antioxidante	58
f. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo (Deoxi-D-Ribosa)	59
6. Métodos de determinación del efecto biológico	60

a. Inhibición de la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL)	60
7. Métodos estadísticos	62
a. Diseño experimental	62
b. Análisis de datos	62
c. Optimización del proceso de extrusión	65
8. Métodos nutrimentales	65
a. Fibra dietaria	65
b. Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	66
c. Perfil de aminoácidos	67
d. Perfil de minerales	67
9. Estudio <i>in vivo</i> del índice glicémico	68
10. Detección de gliadinas	70
11. Análisis sensorial	70
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
A. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	72
1. Composición proximal	72
2. Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA) de las materias primas	72
B. ESTUDIO PRELIMINAR DE EXTRUSIÓN	74
C. ESTUDIO DE EXTRUSIÓN	75
1. Análisis físicos y fisicoquímicos	75
a. Índice de solubilidad en agua (ISA)	75
b. Índice de absorción de agua (IAA)	80
c. Parámetro de color ( $\Delta E$ )	82
2. Análisis de propiedades de cocción	83
a. Tiempo de cocción (TC)	86
b. Aumento de peso (AP)	90
c. Aumento de volumen (AV)	91
d. Pérdidas de sólidos por cocción (PSC)	93
3. Análisis fitoquímicos, funcionales y biológicos	97
a. Clorofilas totales (CT)	99
b. Compuestos fenólicos totales (CFT)	103
c. Actividad antioxidante ABTS total (ABTST)	107
d. Actividad antioxidante DPPH total (DPPHT)	110
e. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo libres (DeoxiLib)	113
f. Inhibición de oxidación del radical hidroxilo ligados (DeoxiLig)	116
g. Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad libres (LDLLib)	120

h. Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad ligados (LDLLig)	123
4. Optimización del proceso de extrusión	125
5. Análisis nutrimental	135
a. Fibra dietaria	135
b. Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	139
c. Perfil de aminoácidos	140
d. Perfil de minerales	142
6. Estudio <i>in vivo</i> del índice glicémico	144
7. Detección de gliadinas	147
8. Análisis sensorial	149
IX. CONCLUSIONES	154
X. BIBLIOGRAFÍA	156
ABREVIATURAS	186

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>1</b>	Diferentes tipos de pastas	9
<b>2</b>	Partes constitutivas del grano de arroz	23
<b>3</b>	Partes constitutivas del nopal. <b>(A)</b> Cladodio o penca, <b>(B)</b> Espinas, <b>(C)</b> Flor, <b>(D)</b> Fruto	30
<b>4</b>	Etapas de procesamiento para la obtención de pastas alimenticias libres de gluten a partir de arroz quebrado y harina de nopal, y materiales obtenidos en las diferentes etapas <b>(A)</b> mezcla, <b>(B)</b> extrusión, <b>(C)</b> cocción.	51
<b>5</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre el índice de solubilidad en agua (ISA) de pastas alimenticias libres de gluten. <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	79
<b>6</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre el índice de absorción en agua (IAA) de pastas alimenticias libres de gluten. <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos	81
<b>7</b>	Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	84
<b>8</b>	Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre el tiempo de cocción (TC) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	88
<b>9</b>	Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre el aumento de peso (AP) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	92
<b>10</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) sobre el aumento de volumen (AV) de pastas alimenticias libres de gluten (H= 28%). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	94
<b>11</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre la pérdida de sólidos por cocción (PSC) de pastas alimenticias libres de gluten. <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	96

<b>12</b>	Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre el contenido de clorofilas totales (CT) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	102
<b>13</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) de pastas alimenticias libres de gluten. <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos	104
<b>14</b>	Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la actividad antioxidante ABTS total (ABTST) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	108
<b>15</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) sobre la actividad antioxidante DPPH total (DPPHT) de pastas alimenticias libres de gluten (H= 28%). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	112
<b>16</b>	Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la inhibición de oxidación del radical OH de los extractos libres (DeoxiLib) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	117
<b>17</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) sobre la inhibición de oxidación del radical OH de los extractos ligados (DeoxiLig) de pastas alimenticias libres de gluten (H= 28%). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	119
<b>18</b>	Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre la inhibición de oxidación LDL de extractos libres (LDLLib) de pastas alimenticias libres de gluten. <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	122
<b>19</b>	Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la inhibición de oxidación LDL de extractos ligados (LDLLig) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). <b>A</b> , superficies y <b>B</b> , contornos.	124
<b>20</b>	Deseabilidad individual y global (combinada) de las variables de proceso y respuestas analizadas durante la optimización.	128
<b>21</b>	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).	146

- 22** Análisis de frecuencia de la prueba general de aceptabilidad (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 nopal; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial de arroz). 150
- 23** Análisis de frecuencia de la prueba 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 nopal; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial de arroz). 151
- 24** Análisis de frecuencia de la probabilidad de compra (1= si, 2= probablemente si, 3= tal vez, 4= probablemente no, 5= no) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz quebrado y nopal; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial de arroz). 153

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>1</b>	Composición proximal de diferentes cereales	25
<b>2</b>	Contenido de proteínas en las diferentes partes del grano de arroz	26
<b>3</b>	Contenido de fenoles y flavonoides en nopal	33
<b>4</b>	Propiedades nutracéuticas asociadas al consumo de nopal	36
<b>5</b>	Diseño experimental central compuesto rotatable, de tres variables independientes temperatura de extrusión (X1, TE), contenido de humedad (X2, CH) y contenido de harina de nopal (X3, CN) ( $\alpha= 1.682$ ).	63
<b>6</b>	Diseño experimental del estudio de extrusión de tres factores.	64
<b>7</b>	Composición química de las materias primas en base seca (b.s.), utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten de arroz quebrado y nopal	73
<b>8</b>	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 nopal.	76
<b>9</b>	Coefficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia para las propiedades físicas y fisicoquímicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.	77
<b>10</b>	Análisis de varianza de las pruebas de cocción evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de nopal.	85
<b>11</b>	Coefficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las pruebas de cocción determinadas en las pastas alimenticias libres de gluten.	87
<b>12</b>	Análisis de varianza de las respuestas fitoquímicas, funcionales y biológicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de nopal.	98
<b>13</b>	Coefficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las respuestas fitoquímicas y funcionales determinadas en las pastas alimenticias libres de gluten.	102

<b>14</b>	Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las respuestas biológicas de las pastas alimenticias libres de gluten.	115
<b>15</b>	Criterios y límites para la optimización del proceso de extrusión de pastas alimenticias libres de gluten elaboradas a partir de arroz quebrado y nopal.	127
<b>16</b>	Valores predichos por los modelos y experimentales de las variables utilizadas en la optimización de pastas libres de gluten a base de harina de arroz quebrado y nopal	130
<b>17</b>	Composición química (% b.s.) y valor energético (kcal/100g) de pasta óptima (PO) a base de arroz quebrado y nopal, pasta control (PC) a base de arroz quebrado, pasta comercial de arroz (PCA) y pasta comercial de sémola de trigo (PCST).	132
<b>18</b>	Valores reales de propiedades físicas y fisicoquímicas de pastas alimenticias libres de gluten elaboradas a base de arroz quebrado y nopal obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento.	133
<b>19</b>	Valores reales de propiedades fitoquímicas y biológicas de pastas alimenticias libres de gluten elaboradas a partir de arroz quebrado y nopal obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento.	134
<b>20</b>	Caracterización nutrimental de las materias primas utilizadas en la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten.	136
<b>21</b>	Caracterización nutrimental de la pasta control (PC), pasta obtenida en condiciones óptimas (PO) en las diferentes etapas de procesamiento (mezcla sin procesar y procesada), y pasta comercial de arroz (PCA).	137
<b>22</b>	Perfil de aminoácidos esenciales en las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento en sus diferentes etapas (mezcla sin procesar y procesada).	141
<b>23</b>	Contenido de minerales de las pastas alimenticias libres de gluten, obtenidas en condiciones óptimas de procesamiento (PO), y requerimientos de ingesta diaria.	143
<b>24</b>	Características e indicadores bioquímicos de admisión de los participantes en el estudio in vivo.	145
<b>25</b>	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.	148

## I. RESUMEN

La enfermedad celíaca (EC) afecta al intestino delgado, desencadenándose y manteniéndose por la ingesta de gluten contenido en trigo, avena, cebada y centeno. Por ello, se propone la producción de alimentos sin gluten, destacando las pastas alimenticias (PA), que tradicionalmente son elaboradas utilizando como ingrediente principal la sémola de trigo (ST), que es fuente de gluten. Se propone reemplazar la ST con arroz quebrado, que es un subproducto de la molienda de arroz y no contiene gluten. Las PA pueden enriquecerse con materias primas altas en compuestos bioactivos, tales como el nopal, que es fuente importante de compuestos fenólicos y fibra dietaria. El objetivo de la presente investigación fue estudiar el efecto del proceso de extrusión sobre las propiedades físicas, fisicoquímicas, de cocción, nutrimentales y sensoriales de PA adicionadas con harina de nopal. Se evaluaron los efectos de la temperatura de extrusión (TE: 88.5-125.5 °C), contenido de humedad (H: 21.27-34.73%) y contenido de nopal (CN: 1.01-22.09%), utilizando un extrusor de doble tornillo para obtener las PA, así como, la metodología de superficie de respuesta para el análisis estadístico. El índice de solubilidad en agua disminuyó combinando bajos CN con altas TE y bajos H. Asimismo, el índice de absorción de agua disminuyó combinando altos CN con altas TE y altos H. La diferencia total de color y tiempos de cocción (TC) disminuyeron combinando altos CN con altos H. Asimismo, el aumento de peso (AP) disminuyó a niveles intermedios de H en todo el rango de CN, mientras que el aumento de volumen disminuyó a intermedias TE, y bajos e intermedios H. Las pérdidas de sólidos por cocción disminuyeron a bajos CN e intermedios H. El contenido de clorofilas totales y compuestos fenólicos totales (CFT) aumentó combinando altos

CN con altos H. Asimismo, los CFT, actividad antioxidante (DPPHT), e inhibición de oxidación de LDL de extractos libres (ELib) aumentaron combinando altos CN con altas TE, mientras que la actividad antioxidante (ABTST) aumentó combinando altos CN con bajos e intermedios H. La mayor inhibición de oxidación del radical OH de los ELib se presentó a altos CN en todo el rango de H, mientras que la mayor inhibición de oxidación del radical OH de los extractos ligados (ELig) se presentó a bajos CN en todo el rango de TE. En los análisis de inhibición de oxidación de LDL de ELib y ELig, los valores aumentaron combinando altos CN con altos H. Las condiciones óptimas de procesamiento fueron: TE= 118.0 °C, H= 31.7%, y CN= 18.0%, con valores predichos para AP= 231.79%, TC= 8.92 min, CFT= 1.62 mg EAG/ g b.s., y % inhibición de la oxidación de LDL (ELib) = 79.96%. Los valores experimentales obtenidos en la validación fueron similares a los predichos por los modelos. La PA obtenida en las condiciones óptimas de procesamiento (PO) presentó mayor contenido de fibra dietaria y digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) que la pasta control (PC) y pasta comercial de arroz (PCA), menor índice glicémico que PC, así como el 100% de la dosis recomendada por la FAO de aminoácidos esenciales, excepto Lys, mostrando ausencia de gliadinas en el análisis de estas proteínas. En el análisis de minerales, PO presentó menores valores de sodio que PCA. En la prueba sensorial de aceptabilidad general, un 85% de los panelistas seleccionaron valores de la escala hedónica  $\geq 5$  en PO. Se obtuvieron PA alimenticias con características físicas, fisicoquímicas y de cocción similares a productos comerciales. Estos alimentos presentaron apropiadas propiedades nutrimentales y antioxidantes, así como elevado contenido de compuestos bioactivos, cuyo consumo muestra potenciales beneficios en la salud de las personas que los consumen.

## ABSTRACT

Celiac disease (CD) affects the small intestine and is triggered and maintained by ingesting gluten provided for wheat, oats, barley, and rye. Therefore, the production of gluten-free foods is proposed, highlighting pasta, which is traditionally made using wheat semolina (WS) as the main ingredient, which is a source of gluten. It is proposed that WS be replaced with broken rice, which is a by-product of rice milling and does not contain gluten. Pasta can be enriched with raw materials high in bioactive compounds, such as nopal, an important source of phenolic compounds and dietary fiber. The objective of the present study was to study the effect of the extrusion process on the physical, physicochemical, cooking, nutritional, and sensory properties of pasta added with nopal flour. The effects of extrusion temperature (ET: 88.5-125.5 °C), moisture content (MC: 21.27-34.73%), and nopal content (NC: 1.01-22.09%) were evaluated using a twin-screw extruder to obtain pasta, as well as the response surface methodology for the statistical analysis. The water solubility index decreased by combining low NC with high ET and low MC. Likewise, the water absorption index decreased by combining high NC with high ET and MC. The total color difference and cooking times (CT) decreased by combining high NC with high MC. Likewise, the weight gain (WG) decreased at intermediate MC throughout the NC range, while the volume gain decreased at intermediate ET and low and intermediate MC. The cooking loss decreased at low NC and intermediate MC. The total chlorophyll content and total phenolic compounds (TPC) increased by combining high NC with high MC. Likewise, the TPC, antioxidant activity (DPPHT), and inhibition of LDL oxidation of free extracts increased by combining high NC with high ET, whereas the antioxidant activity (ABTST)

increased by combining high NC with low and intermediates MC. The greatest inhibition of OH radical oxidation of the free extract occurred at high NC throughout the range of MC, while the highest inhibition of OH radical oxidation of bound extract occurred at low NC throughout the ET range. In the analyses of inhibition of LDL oxidation from free and bound extracts, the values increased by combining high NC with high MC. The optimal processing conditions were: ET = 118.0 °C, MC = 31.7%, and NC = 18.0%, with predicted values for WG = 231.79%, CT = 8.92 min, TPC = 1.62 mg GAE/g d.b., and % inhibition of LDL oxidation (free extract) = 79.96%. The experimental values obtained in the validation were similar to those predicted by the models. Pasta obtained under optimal processing conditions (OP) had a higher dietary fiber content and *in vitro* protein digestibility (IVPD) than control pasta (CP) and commercial rice pasta (CRP), a lower glycemic index than CP, and 100% of the FAO recommended dose of essential amino acids, except Lys, showing absence of gliadins in the analysis of these proteins. In the mineral analysis, OP presented lower sodium values than CRP. In the sensory test of general acceptability, 85% of the panelists selected values of the hedonic scale  $\geq 5$  in OP. Pasta with physical, physicochemical, and cooking characteristics similar to commercial products was obtained. These foods presented appropriate nutritional and antioxidant properties, as well as a high content of bioactive compounds, whose consumption presents potential benefits for the health of consumers.

## II. INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, los problemas de malnutrición y hambre en las personas con enfermedad celíaca, se sustentan en la falta de inclusión de micronutrientes en la dieta y en el bajo consumo de alimentos que contengan buena disponibilidad de proteína, energía y micronutrientes (FAO 2014a).

La enfermedad celíaca (EC), o celiacía, es una enteropatía que se caracteriza por la inflamación crónica del intestino delgado debido a una intolerancia a algunas proteínas específicas presentes en algunos cereales, particularmente a las prolaminas del trigo (gliadinas), cebada (hordeínas), centeno (secalinas) y especies híbridas como el triticale, y, en algunos casos, de la avena (aveninas) (Fasano y col 2003). La inflamación continua de la mucosa intestinal trae como consecuencia el aplanamiento de las vellosidades, que deriva en la mala absorción de nutrientes. Como síntomas típicos se presentan diarrea, pérdida de peso, estrés, vómitos, anemia y dolor abdominal. El único tratamiento que existe hoy en día es seguir estrictamente un plan de alimentación libre de gluten de por vida. Si el plan de alimentación no se lleva a cabo apropiadamente se desarrollan complicaciones como osteoporosis, desarrollo de linfomas intestinales, o pueden presentarse problemas en el desarrollo y en la fertilidad de los pacientes (Moscoso y Quera 2016).

En los últimos años los casos de intolerancia al gluten se han visto aumentados en todo el mundo. En México, se estima que 0.9% de los habitantes, sufre de enfermedad

celiaca, un 0.7% padece alergia al trigo y de 1 a 25% presenta sensibilidad al gluten no celiaca o sufre de intestino irritable/dispepsia (Espiru-Ramírez y col 2021).

En atención a dichos diagnósticos, es necesaria la producción de alimentos que presenten un alto consumo y que de manera sinérgica aporten mayor calidad nutricional y que además contribuyan a mejorar la salud y bienestar del consumidor como lo podrían ser las pastas alimentarias. La pasta es un alimento ampliamente consumido y de alta aceptabilidad a nivel mundial, debido a su bajo costo, además de su facilidad de preparación y almacenamiento (Astaíza y col 2010). En los últimos años diversos autores han modificado la formulación de las pastas, utilizando nuevos ingredientes para mejorar su valor nutricional y nutracéutico (Goñi y Valentín-Gamazo 2003; Brennan y col 2004), pudiendo ser utilizadas como un vehículo para la incorporación de compuestos bioactivos o fitoquímicos (Chillo y col 2008), logrando un incremento de su actividad antioxidante (Fares y col 2010).

El arroz es un cereal apto para consumirse por las personas que presentan intolerancia al gluten, es una buena fuente de energía, ya que su mayor componente son carbohidratos, posee un bajo contenido de grasa, además de ser fácilmente digerible e hipoalergénico (Giménez y col 2013). Por su parte, la adición de nopal podría mejorar de manera considerable el aporte de fibra dietaria en las pastas alimenticias, además de aportar diversos compuestos bioactivos de gran interés para la nutrición humana. Se ha reportado que estos compuestos bioactivos poseen actividad antioxidante, anticarcinogénica, hipoglucémica, hipolipidémica e hipocolesterolémica (Torres-Ponce y col 2015).

En condiciones óptimas, la tecnología de extrusión es un adecuado método para la preparación de pastas sin gluten, por otra parte, en el procesamiento con un

extrusor, las condiciones para mantener la estabilización y personalización de la pasta son mucho más simples de satisfacer, y el tiempo de secado se acorta a 40-50 min a 70-80 °C. Por consiguiente, los costes de producción se pueden reducir, en comparación con los métodos tradicionales y ayuda a una significativa retención de nutrientes, debido al empleo de altas temperaturas y tiempos cortos de procesamiento (Singh y col 2007). Otra importante ventaja es la simplicidad de producción, ya que el proceso no requiere de la gran energía de secadoras, cocción en agua hirviendo, vapor, o freído en aceite (Wójtowicz 2011).

La alimentación actualmente, además de satisfacer nuestras necesidades de sobrevivencia, toma el papel de garantizar el bienestar y la salud. A nivel mundial las tendencias de alimentación por parte de los consumidores indican que hay un interés por la preferencia de nuevos productos con propiedades funcionales, que aporten un plus adicional más allá de la nutrición básica (Krishnan y Phabasankar 2012).

El propósito de tener un impacto en la reducción de la incidencia de la malnutrición y sintomatología clásica que presentan los pacientes con enfermedad celíaca justifica la necesidad de producir una pasta alimenticia libre de gluten con alto valor nutricional/nutracéutico a base de arroz (*Oryza sativa* L.) adicionada con harina de nopal, con la finalidad de tener una alternativa segura para incluirse en la dieta de este tipo de pacientes además de que estos productos sean ubicados en la categoría de alimentos funcionales.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### A. PASTAS ALIMENTICIAS

Según la NORMA Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Se denomina pasta alimenticia, a cualquier producto obtenido por el amasado homogéneo de sémola de trigo, semolina, harinas de cualquier cereal o alguna combinación de éstas con agua y otros ingredientes opcionales permitidos, siendo moldeado, laminado o extruido y sometido o no a un proceso térmico de desecación.

A través del tiempo, la pasta ha evolucionado en un gran número de variedades (**Figura 1**) y formas, en distintos lugares su nombre puede ser diferente y en ocasiones se utiliza un solo nombre para referirse a formas con diferente aspecto (Mataix–Verdú 2005).

La pasta es un alimento que presenta alta preferencia por parte de los consumidores a nivel mundial, debido a que es fácil de cocinar, es económica y tiene una larga vida de anaquel (Sabandis y col 2010). Además, la razón del éxito y la difusión de las pastas alimenticias en las últimas décadas, se debe a la posibilidad de utilizar otras materias primas para su producción, no solamente trigo duro (Hernández-Aguirre y col 2013). Las pastas son alimentos tradicionales en muchos países en vías de desarrollo, ya que los problemas nutricionales afectan a una gran parte de sus habitantes y, estos productos, representan una fuente importante de energía y existe alta versatilidad en su preparación (Granito y Ascanio 2009). Las pastas son consumidas cotidianamente en muchas culturas, convirtiéndolas en un producto



**Figura 1.** Diferentes tipos de pastas

Mataix–Verdú (2005)

básico en la dieta. Además, su consumo brinda la oportunidad de aprovechar las interacciones entre los macro y micronutrientes (Camelo-Méndez y col 2018), por lo cual es importante considerar este alimento en dietas sanas y equilibradas (Ridner y col 2015). Estos alimentos, además de tener un bajo contenido de grasa, representan una valiosa fuente de carbohidratos complejos, que son un combustible de alta importancia para realizar las actividades diarias (Granito y col 2014).

## **1. Historia**

Existen diversas teorías sobre el origen de la pasta. Diversos historiadores otorgan el descubrimiento a Marco Polo en el siglo XIII, el cual la dio a conocer en Italia de vuelta de uno de sus viajes al continente asiático, en 1271. Por otra parte, distintos investigadores aseguran su origen a civilizaciones antiguas etruscas, que la producían mediante a través de la trituration de diferentes cereales y granos ancestrales mezclados con agua, que luego cocían, teniendo como resultado un alimento de sabor agradable y nutritivo (IPO 2014).

## **2. Clasificación de las pastas**

De acuerdo con Alarcón-Domene y col (2003), en base a los ingredientes que constituyen a las pastas alimenticias, estas se pueden clasificar en:

- *Pastas alimenticias simples*: elaboradas procedentes del trigo.
- *Pastas alimenticias compuestas*: adicionadas con huevo, leche, frutas, gomas, verduras, hortalizas y leguminosas o elaboradas a partir de otra materia prima diferente a la sémola de trigo.
- *Pastas alimenticias rellenas*: rellenas en su interior con diferentes tipos de carnes y quesos (AMEXIGAPA 2011).

### **3. Producción y consumo de pasta**

La producción mundial de pastas reportada en el año 2022 fue cerca de 17 millones de toneladas (t), de la cual un 22.7% fue aportada por Italia. Este país no solamente tiene, por lejos, el consumo per cápita más alto del mundo (25.3 kg por persona por año), sino que, además, exporta casi la mitad del total mundial (IPO 2023).

Los principales países productores después de Italia son: Estados Unidos, Brasil, Rusia, Turquía, Irán, Venezuela, Egipto, Alemania y México. Nuestro país reportó una producción de 337,000 t, aportando así un 3.23% de la producción total a nivel mundial (IPO 2023).

### **4. Composición química de pasta alimenticia**

Las pastas alimenticias son una fuente importante de carbohidratos, especialmente almidón. Una porción de 100 g de pasta cruda contiene aproximadamente 68.1 g de almidón, 4.2 g de azúcares solubles, 2.7 g de fibra, 10.9 g de proteína y 1.4 g de grasa, lo que proporciona aproximadamente 353 kcal (Melini y col 2020). El contenido en fibra en las pastas alimenticias es variable (esta depende del grado de extracción de la harina); en minerales destacan el zinc, fósforo y selenio, mientras que tiamina y niacina en vitaminas (Moreiras y col 2013).

La pasta de trigo integral contiene menos calorías por 100 g de producto seco (alrededor de 300 kcal), aporta más fibra (6 g) y 25% más de proteínas con respecto a la pasta refinada tradicional. Además, es una excelente fuente de vitaminas B, hierro y, proporciona niveles significativamente más altos del oligoelemento esencial selenio,

un micronutriente con propiedades antioxidantes. Aunado a esto, la pasta integral contiene niveles apreciables de ácido alfa-linolénico (Giacco y col 2016).

Cuando la pasta se cocina al dente, también tiene un índice glucémico bajo, que oscila entre 35 y 50, dependiendo del tipo de pasta (Granito y col 2014). El índice glucémico (IG) mide la respuesta glucémica e insulinémica a los carbohidratos consumidos en los diferentes alimentos haciendo comparación con la respuesta de un alimento catalogado como referencia, regularmente, glucosa o pan blanco. El IG constituye la calidad del hidrato de carbono ingerido. La carga glucémica (CG) es el resultado de la multiplicación del valor de IG por la cantidad consumida y da como resultado el efecto glucémico de la dieta total (Hernández y col 2013). El índice glucémico de la pasta es mucho más bajo que el del pan, siendo de 50 y de 70, respectivamente. Además, la pasta posiblemente puede ralentizar las tasas de digestión y puede contribuir a una mayor saciedad (Melini y col 2020).

Una de las características que más destaca a las pastas alimenticias es el aporte de carbohidratos de absorción lenta, ya que estos se catalogan como favorables para personas sanas, para impedir una respuesta alta de insulina e hipoglucemia entre cada tiempo de comida (Plaza-Díaz y col 2013). En el caso de las personas diabéticas o con síndrome de resistencia a la insulina, para mejorar su control de la glucosa sanguínea, estas deben tener preferencia por consumir, alimentos con carbohidratos de lenta absorción, los cuales podrían constituir hasta un 60% de la energía total, sin que esto empeore el control glucémico ni lipídico de los pacientes diabéticos (Luna-López y col 2014).

En relación al contenido de proteína, la más importante en pastas, es el gluten. El gluten confiere la elasticidad típica en las pastas y su contenido es alrededor del 12%.

Su valor biológico es bajo debido a su bajo aporte de aminoácidos esenciales. Estas proteínas son deficientes en lisina. Una porción de 100 g de pasta aporta alrededor de 22-26% de la ingesta dietética diaria recomendada de este nutrimento (Hernández-Aguirre y col 2013; Giacco y col 2016).

Las proteínas que tienen los cereales de uso común para la elaboración de pastas alimenticias, poseen cantidades limitadas de aminoácidos esenciales como lisina y triptofano (Gil-Hernández 2010; Gebremariam y col 2014). En los cereales, en general la lisina se encuentra en cantidades inferiores a las requeridas para la nutrición infantil (Mao y col 2014). La pasta tradicional de sémola, presenta un contenido de lisina de  $0.38 \pm 0.01$  g/100g de muestra. Debido a esto, se ha propuesto la sustitución parcial de la harina de sémola de trigo por materias primas que permitan aportar mayor calidad nutricional (Dussán-Sarria y col 2019).

## **5. Pastas alimenticias como alimentos funcionales**

Debido a la importancia de incluir los compuestos bioactivos en la dieta, durante el desarrollo de nuevos productos se ha enfocado a la producción de alimentos que además de proporcionar nutrientes, aporten un efecto benéfico en la salud, siendo esto una tendencia en el mundo actual. Por ello, se ha iniciado una evolución en la industria de los alimentos, enfatizando la relación alimentación y salud, en razón de los problemas de nutrición que se ven actualmente en el mundo (Ayuso-Peraza y Castillo-León 2017).

Según la tradición, la pasta es aparentemente un alimento muy simple y saludable, por ser una buena fuente de carbohidratos, proteínas energía. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado nuevas fórmulas de tal manera que, además de proporcionar nutrientes y energía, la pasta actúe de forma benéfica en la salud

humana, mejorando respuestas fisiológicas y/o reduciendo el riesgo de padecer enfermedades. A estas pastas se les conoce como pastas funcionales (Nicolletti y col 2012; Melini y col 2020).

El uso de ingredientes funcionales, como harinas integrales y compuestas, así como la adición de alimentos de origen vegetal y diferentes subproductos de la industria alimenticia, se ha explorado cada vez más como una estrategia para mejorar el contenido de compuestos bioactivos en las pastas tradicionales y en las pastas sin gluten (Melini y col 2020).

## **6. Pastas alimenticias libre de gluten**

Las pastas libres de gluten, han tenido particular atención en los últimos años pues los casos de enfermedad celíaca, intolerancia y alergia al trigo, se han incrementado, es por eso que se han buscado materias primas con la finalidad de sustituir totalmente la sémola de trigo y obtener pastas alimenticias de buena calidad. Algunas materias primas que se han estudiado para la elaboración de este tipo de pastas son las siguientes: yuca (Fiorda y col 2012), arroz (Menga y col 2016; Phongthai y col 2017; Bousla y col 2019), sorgo (Palavecino y col 2018); y leguminosas (Laleg y col 2017).

A causa del aumento de casos de intolerancia al gluten a nivel mundial, se ha visto notablemente que las personas han optado por preferir las tendencias actuales de alimentación saludable y a consumir productos que no contengan gluten, sean reducidos en grasas, carbohidratos y azúcares añadidos (Carvajal-Alvarado 2021).

Esta problemática lleva a una mayor demanda de productos libres de gluten; entre estos se encuentran las pastas. El gluten juega un papel importante en la elaboración de las pastas, ya que la falta de este, afecta la estructura de la matriz al reducir la red formada por proteínas de gluten coaguladas (Padalino y col 2017). Algunos autores

reportan que la forma más sencilla de mejorar la estructura de los productos libres de gluten, es agregar otros ingredientes funcionales y aditivos (por ejemplo, proteínas, almidones, gomas, hidrocoloides, emulsionantes, fibra dietética), para sustituir a las harinas de trigo, lo cual se ha logrado adicionando materias primas tales como arroz, maíz, sorgo, amaranto, quínoa o garbanzo (Velasco-Rodríguez 2022). Para que un alimento sea considerado libre de gluten debe presentar menos de 20 ppm (20 mg/kg) de gluten (Estévez y Araya 2016). Una alternativa nutritiva es incorporar en la formulación ingredientes no tradicionales como harinas elaboradas a partir de productos vegetales, las que además de ser libres de gluten, pueden aportar proteínas y compuestos bioactivos. Además la utilización de residuos o subproductos de la industria alimentaria para la elaboración de pastas alimenticias, favorece el aprovechamiento de los residuos agroindustriales, haciendo que estos sean subproductos de alto valor y su vez favoreciendo los modelos de producción sustentable más actuales, ya que dichos residuos representan una fuente importante de compuestos bioactivos (vitaminas, minerales, fibra dietaria y antioxidantes), que presentan un alto potencial funcional (Preciado-Saldaña y col 2022).

Algunos de los trabajos que se han reportado sobre la elaboración de pastas libres de gluten, utilizando diferentes materias primas y algunos subproductos, son los siguientes:

Fiorda y col (2013) realizaron un estudio para evaluar la calidad (color, textura y valor nutricional) de pastas sin gluten a base de harina de amaranto y yuca. En dicho trabajo, fue comparado el valor nutricional del producto que mostró las mejores características de textura con el de pastas comerciales, producidas a partir de sémola y con trigo integral. La utilización de harina pregelatinizada, almidón de yuca nativo y

harina de amaranto (10:60:30), respectivamente, permitió el desarrollo de un producto con color, textura y valor nutricional adecuado, mostrando calidad similar a los productos comerciales de trigo. Este producto presentó color amarillo claro, aceptable contenido de fibra [9.37 g (100 g)<sup>-1</sup>] y de proteína [10.41 g (100 g)<sup>-1</sup>], además de firmeza adecuada (43.6 N) y baja adherencia (3.2 N). La utilización de bagazo de yuca aumentó el contenido de fibra del producto, por lo que podría usarse como ingrediente en la formulación de pastas y brindar una opción adicional entre los productos más saludables y sin gluten en el mercado.

Islas-Rubio y col (2014) elaboraron una pasta libre de gluten a partir de harina de amaranto, la utilización de amaranto crudo y germinado fue adecuada para aumentar la calidad nutricional mediante el incremento de la fibra dietética y proteínas de alta calidad, e incluso para obtener pastas sin gluten con calidad de cocción aceptable. En este trabajo se llegó a la conclusión de que la mezcla de harina de amaranto crudo y harina de amaranto germinado permite el reemplazo total del trigo para obtener una pasta libre de gluten.

Menga y col (2016) desarrollaron una pasta sin gluten a base de harina de arroz adicionando harina de chía. La adición de harinas de chía aumentó la fracción de almidón de digestión lenta en harina de arroz, que es comúnmente conocida por tener un alto índice glucémico. Los resultados de dicho trabajo sugieren agregar chía como agente espesante en la formulación de pasta libre de gluten, para conferir características más saludables.

Vem-Chan y col (2022) elaboraron una pasta alimenticia libre de gluten a partir de un subproducto del proceso de molienda de granos de arroz negro. La pasta a base de harina de arroz negro fue elaborada por extrusión y adicionada con harina de arroz

blanco 1:2 p/p, y diferentes aditivos para mejorar los parámetros de textura y propiedades viscoelásticas. Los parámetros que se evaluaron fueron cocción, textura, color y antocianinas totales. Donde lograron reutilizar un residuo del procesamiento del arroz negro y desarrollar una innovadora pasta de alta calidad, con peculiar sabor a castaña, color púrpura natural, con propiedades nutricionales y antioxidantes.

## **B. ENFERMEDAD CELÍACA**

### **1. Generalidades**

La enfermedad celíaca (EC) se debe a una intolerancia a las proteínas presentes en el gluten (gliadinas, secalinas, hordeínas y aveninas) la cual se relaciona con un daño severo permanente en la mucosa del intestino delgado. Trayendo como consecuencia inmediata una mala absorción de nutrientes (principios inmediatos, sales y vitaminas) a nivel del tracto digestivo, su repercusión patológica va a depender de la edad y del estado general de salud del paciente.

La intolerancia es crónica y permanente, se conserva a lo largo de toda la vida y se desarrolla en personas genéticamente predispuestos a presentarla. La ausencia de lactancia materna, así como la introducción temprana de estos cereales durante la ablactación de personas propensas, es posible que sean factores de riesgo para su desarrollo. El apego a un plan de alimentación estrictamente libre de gluten beneficia a la desaparición de síntomas clínicos recurrentes y del daño severo de la mucosa intestinal (Polanco-Allue y col 2015).

### **2. Déficits nutricionales**

La existencia de déficits nutricionales en los pacientes celíacos se conoce desde hace tiempo. Así se ha demostrado que tienen niveles más bajos de hierro, ácido fólico,

vitamina B12, prealbúmina, peso y contenido de grasa y unas cifras más elevadas de transferrina. Hay datos contradictorios sobre la posibilidad de que los niveles de estos déficits puedan estar en relación con el grado de lesión histológica (Haapalahti y col 2015). Hay también estudios que muestran el déficit en las cifras de Magnesio (Mg), en los casos de EC típica las causas del déficit de Mg parecen ser el paso acelerado de los alimentos por el tubo digestivo, la esteatorrea y la escasa ingesta debido a la falta de apetito. De cualquier forma, existen datos que hablan del déficit de Mg en pacientes con EC con dieta sin gluten que parece deberse a que una fuente importante de Mg son los cereales que estos pacientes tienen restringidos en gran parte (Rujner col 2014).

Una de las razones expuestas para la existencia de déficit nutricionales en los pacientes celíacos es que los productos sin gluten sin enriquecer suelen ser bajos en fibra, hierro, folato, tiamina, riboflavina y niacina; mientras, los productos con gluten suelen estar enriquecidos (la mayoría de las veces de una manera indirecta) con esos elementos.

A esto hay que unir que hay pacientes que adicionalmente presentan sensibilidad a otros alimentos u otras intolerancias que pueden limitar aún más su dieta (Kemppainen y col 2010).

### **3. Tratamiento: dieta sin gluten**

El tratamiento recomendado es la exclusión del gluten de la dieta de manera estricta de por vida (Hill y col 2005). Con esta medida se consigue la normalización de los parámetros nutricionales, la desaparición de los síntomas digestivos, mejora de la densidad ósea, corrección del peso y de la talla. Los parámetros hematológicos y

serológicos también se normalizan, así como los psicológicos. Se ha comprobado una mejoría en la calidad de vida, disminución de abortos espontáneos y la disminución de procesos tumorales en comparación con individuos celíacos que no realizaban dieta (Jadresin y col 2008). Así el riesgo de padecer cáncer de un paciente celíaco tras 5 años de dieta sin gluten es similar a un sujeto sano (Hopman y col 2006).

Para llevar una dieta sin gluten, es básico saber seleccionar los alimentos que no lo contienen. Existen diversos tipos de alimentos sin gluten, como los que son naturalmente libres, los que en el empaque declaran no contenerlo y los que al leer la etiqueta se puede interpretar que no lo contienen. Por ello, es esencial que las personas diagnosticadas con EC aprendan a interpretar las etiquetas nutricionales (Shepherd y Gibson 2006; Hlywiak 2008).

El término “sin gluten”, “gluten free” o “sin TACC (sin trigo, avena, centeno y cebada)” se usa generalmente para indicar un nivel inofensivo de gluten y no para referirse a su ausencia completa (García 2006). La relación exacta entre la cantidad de gluten ingerida y el momento en el que se presentan los síntomas y las anomalías histológicas, se desconocen, ya que la involucrada es una respuesta inmune inmediata. Es por esto que existe controversia en la definición de una dieta sin gluten (Hischenhuber y col 2006).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización para la Agricultura y la Alimentación, propusieron a través del Codex Alimentarius (2008), sus recomendaciones para definir a los alimentos sin gluten. Éstas, son usadas como referencia o estándar universal y marcan 20 ppm como contenido máximo en los alimentos etiquetados como libres de gluten. La dieta sin gluten puede definirse como una exposición baja de acuerdo al Codex Alimentarius o cero tolerancia al gluten. La

mayoría de los países europeos siguen la definición del Codex. En Canadá y la mayor parte de Estados Unidos, llevar una dieta sin gluten implica consumir alimentos elaborados con uno o más ingredientes que no contengan trigo, centeno, cebada, o sus variedades híbridas, y cuyo contenido de gluten no sobrepase las 20 ppm (Kapoerchan y col 2007).

#### **4. Implicaciones de la dieta sin gluten**

La dieta sin gluten tiene gran impacto nutricional en el celíaco, ya que es restrictiva. Asimismo, un porcentaje alto de pacientes con esta condición carecen de guía profesional para adecuar su dieta, por lo que suelen tener dietas poco balanceadas y deficientes en algunos micronutrientes (Nelson y col 2007).

El desbalance que se observa en la dieta del celíaco, se explica por la eliminación de los productos de panificación y los elaborados con harinas de trigo, centeno, cebada y avena. Éstos, son buenos aportadores de fibra y minerales, así como de los principales representantes del grupo de los cereales en las pirámides nutrimentales. También son de los principales aportadores de energía y carbohidratos de la dieta. Por lo tanto, su eliminación o la poca sustitución con otros cereales, puede traer como consecuencia una dieta monótona, con bajo aporte de fibra y minerales. Así también, puede inducir exceso en el consumo de los otros macronutrientes como grasas y proteínas (Thompson y col 2005; Lee y col 2009).

En una investigación realizada por Thompson y col (2005), estimaron la ingestión dietaria de adultos en dieta sin gluten, observaron que menos de la mitad de las mujeres participantes consumía la cantidad de hierro recomendada. Así mismo, menos de un tercio de las mujeres consumía la cantidad de calcio recomendada. Este último comportamiento también se observó en el estudio de Kinsey y col (2008), en donde

además del consumo bajo de calcio en adultos celíacos en dieta sin gluten, también tenían un consumo bajo de fibra y vitamina D.

Además del impacto que tiene la dieta sin gluten sobre el estado de nutrición del paciente, también impacta significativamente su estilo de vida debido a diversos cambios y adaptaciones que se deben hacer en torno a la dieta. Estos cambios llegan a impactar negativamente al paciente, afectando el apego a la dieta sin gluten. Asimismo, se observó que, al llevar una dieta sin gluten, los pacientes evitaban viajar, así como comer fuera de casa. Además, les preocupaban las dificultades de mantener este tipo de dieta en el hospital. Los pacientes indicaron que les era difícil encontrar alimentos sin gluten o saber si eran o no aptos para celíacos, por lo que accidentalmente ingerían alimentos con gluten (Zarkadas y col 2006).

Otros factores que influyen en el apego a la dieta sin gluten, son la poca disponibilidad, las cualidades sensoriales y el mal etiquetado de los productos, así como el costo (Ferreira-Corona y col 2012). Esto coincide con los datos encontrados en los estudios de Lee y col (2007) y Whitaker y col (2009), quienes comentan que todos los productos libres de gluten son mucho más caros que sus homólogos elaborados con trigo.

## **C. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA ELABORACIÓN DE PASTAS ALIMENTICIAS**

### **1. Arroz**

#### **a. Aspectos generales**

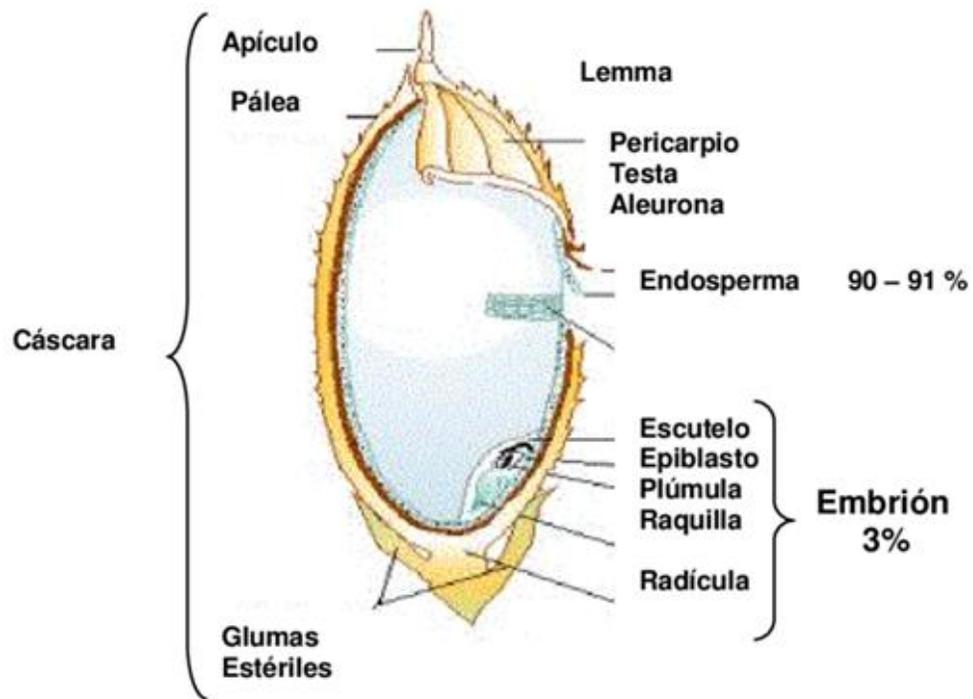
El arroz (*Oryza sativa* L.) pertenece a la familia Poaceae de las gramináceas siendo una planta monocotiledónea. El grano de arroz, usualmente es llamado semilla, tras

ser cosechado este se forma por el fruto cariopse y por la cáscara, la cáscara se compone por las glumelas (palea y lema). En la industria alimentaria consideran arroz cáscara al que se compone por cariopse y glumelas (**Figura 2**) (Franquet-Bernis y Borrás-Pamies 2009).

Con respecto a su cultivo, se considera un cultivo tropical y subtropical, presentándose su producción más elevada a nivel mundial en climas húmedos tropicales, cultivándose también en regiones húmedas de los subtrópicos y en climas mediterráneos y templados.

Extendiéndose el cultivo desde 49-50° de latitud norte a los 35° de latitud sur; cultivándose desde los 2.500 metros sobre el nivel del mar hasta el mismo nivel del mar. Del torrencial de las lluvias dependen las técnicas de cultivo, sobre todo cuando se cultiva en tierras de temporal (Franquet-Bernis y Borrás-Pamies 2009). El cultivo de arroz requiere un rango de temperatura de 10 a 13 °C para germinar, considerándose un rango óptimo entre 30 y 35 °C. En temperaturas superiores a 40 °C no se lleva a cabo la germinación.

El cultivo puede llegar a desarrollarse en una amplia variedad de suelos, desde un suelo arenoso hasta un terreno arcilloso. Sin embargo, el suelo óptimo suele ser de textura fina, particularmente en aquellos inundados muy cercanos a la orilla de los ríos.



**Figura 2.** Partes constitutivas del grano de arroz

Franquet-Bernis y Borrás-Pamies (2009)

## **b. Producción de arroz**

La producción de arroz a nivel mundial reportada en el año 2022 fue de 787.2 millones de toneladas. China se posicionó como el líder productor de arroz aportando 212 millones de toneladas de la producción mundial, seguido de India, Bangladesh, y Vietnam (FAO 2023).

México ocupó el lugar número 66 en el año 2022, y se estima que contribuye con 2 de cada 10 000 kilogramos cosechados (AgroSíntesis 2023).

El volumen promedio de la producción nacional para el periodo 2021-2022 fue de 246.3 mil toneladas anuales con un rendimiento de 5.7 toneladas por hectárea, este último por encima de la media mundial (4.5 toneladas por hectárea). En México, el arroz es cultivado principalmente en los estados de Nayarit, Campeche y Michoacán. Nayarit es el principal productor, pues aporta cerca del 26.3% de la producción nacional de este cereal (AgroSíntesis 2023).

## **c. Composición química y aspectos nutricionales**

En la **Cuadro 1** se puede observar la comparación de la composición química del arroz con respecto a otros cereales. Su contenido de proteína oscila entre un 7-9%, el arroz aporta el 60% de la proteína total de la dieta en países asiáticos considerándose así la principal fuente proteica de sus habitantes (Shih 2003).

El contenido de proteína del arroz varía dependiendo según la parte que se considere como puede observarse en el **Cuadro 2**.

El embrión es la parte más pequeña del grano, pero es la que contiene el mayor contenido proteico (Aldaco-Luna y col 2010).

**Cuadro 1.** Composición proximal de diferentes cereales

<b>Propiedad (%)</b>	<b>Arroz</b>	<b>Trigo</b>	<b>Maíz</b>	<b>Cebada</b>	<b>Sorgo</b>	<b>Centeno</b>	<b>Avena</b>
<b>Proteínas</b>	7.3	10.6	9.8	11.0	8.3	8.7	9.3
<b>Lípidos</b>	2.2	1.9	4.9	3.4	3.9	1.5	5.9
<b>Carbohidratos</b>	64.3	69.7	63.6	55.8	58.0	71.8	62.9
<b>Fibra Total</b>	0.8	1.0	2.0	3.7	4.1	2.2	5.6
<b>Cenizas</b>	1.4	1.4	1.4	1.9	2.6	1.8	2.3

Shih (2003).

**Cuadro 2.** Composición química en las diferentes partes del grano de arroz

<b>Propiedad (%)</b>	<b>Arroz cáscara</b>	<b>Grano integral</b>	<b>Grano pulido</b>	<b>Cáscara</b>	<b>Salvado</b>	<b>Embrión</b>
<b>Proteínas</b>	6.7-8.3	8.3-9.6	7.3-8.3	2.3-3.2	13.2-17.3	17.7-23.9
<b>Lípidos</b>	2.1-2.7	2.1-3.3	0.4-0.6	0.4-0.7	17.0-22.9	19.3-23.8
<b>Fibra Total</b>	19.1	4.5	2.7	77.3	27.6	-
<b>Cenizas</b>	3.4-6.0	1.2-1.8	0.4-0.9	15.3-24.4	9.2-11.5	6.8-10.1

Shih (2003).

Según la FAO, el arroz es considerado un alimento básico predominante en varios países, 17 países asiáticos y del Pacífico, 9 países americanos y 8 países pertenecientes al continente africano, además se caracteriza por suministrar el 50% de la energía alimentaria a nivel mundial (FAO 2014b).

El arroz es una rica fuente de energía; su perfil de aminoácidos indica que su aminoácido limitante es lisina, sin embargo, contiene altos valores de ácido glutámico y aspártico. El arroz, por sí solo, no aporta todos los nutrientes indispensables para una alimentación completa y adecuada. (FAO 2014b).

La harina de arroz integral es una rica fuente natural de vitamina E, que contiene hasta 300 mg/kg (Shin y col 1997). Los componentes principales de la vitamina E en la harina de arroz integral son tocoferol, tocotrienol,  $\gamma$ -tocoferol y  $\gamma$  tocotrienol. Además, también posee aproximadamente 3000 mg/kg de  $\gamma$ -orizanol, que es una mezcla de 10 ésteres ferulados de alcohol triterpénico (Xu y col 1999). Igualmente, se ha informado que el  $\gamma$ -orizanol posee la capacidad de reducir los niveles de colesterol en plasma, los componentes de  $\gamma$ -orizanol pueden tener funciones antioxidantes debido a que en su estructura incluye ácido ferúlico, un fuerte antioxidante (Sugano y col 1997).

El arroz contiene numerosos compuestos fenólicos, incluidos los ácidos ferúlico y cumárico en cantidades bajas, y estos compuestos polifenólicos son potentes antioxidantes (Itani y col 2002).

Los compuestos fenólicos están asociados principalmente con el pericarpio del arroz, por lo que el proceso de molienda reduce la concentración de estos compuestos en el grano. Además, los granos con un color de pericarpio más oscuro, como el arroz rojo y negro, contienen mayores cantidades de polifenoles (Tian y col 2004). La concentración de fenoles totales en el grano se ha asociado positivamente con la

actividad antioxidante (Itani y col 2002; Goffman y Bergman 2004; Zhang y col 2006), con potenciales efectos benéficos sobre la salud, como la reducción de estrés oxidativo (Ling y col 2001; Hu y col 2003), ayudan en la prevención del cáncer (Chen y col 2006), en el control de lípidos en sangre y enfermedades relacionadas, que pueden ayudar en la prevención de problemas cardiovasculares (Ling y col 2001), y en la prevención de las complicaciones de la diabetes (Morimitsu y col 2002; Yawadio y col 2007).

Si bien el arroz no se encuentra entre los alimentos con mayores concentraciones de compuestos fenólicos, puede ser una fuente importante de estos compuestos debido a su amplia utilización y consumo en la alimentación (Walter y Marchesan 2011).

## **2. Nopal**

### **a. Aspectos generales**

El nopal está muy relacionado con la historia de México, debido a que la mayor parte de sus diferentes especies son originarias de este país. Desde las civilizaciones que se establecieron en la época prehispánica, es decir, Maya, Olmeca, Tolteca, entre otras, le daban diferentes usos al nopal, además de ser un alimento, ellos lo utilizaban como medicamento para varias enfermedades. Su uso continuó desde aquella época hasta la actualidad, tomando particular interés en los últimos años por sus diferentes enfoques terapéuticos (Anaya-Pérez 2001).

El nopal pertenece a la familia de las cactáceas, género *Opuntia*. Dentro del grupo de las cactáceas se encuentran diferentes plantas, tales como nopales, candelabros, biznagas, pitayos, órganos, garambullos, peyotes, cardenches y junco, entre otros (INEGI, 2007). El género *Opuntia* posee 377 especies todas endémicas del continente

americano, de las cuales México cuenta con 104 silvestres y 60 endémicas. Las zonas áridas o semiáridas son las principales en donde las cactáceas crecen, sin embargo, estas también pueden crecer en zonas con clima frío y templado. Otro aspecto importante es que protegen la fauna silvestre, tomando así, un papel de suma importancia en el ecosistema (INEGI 2007).

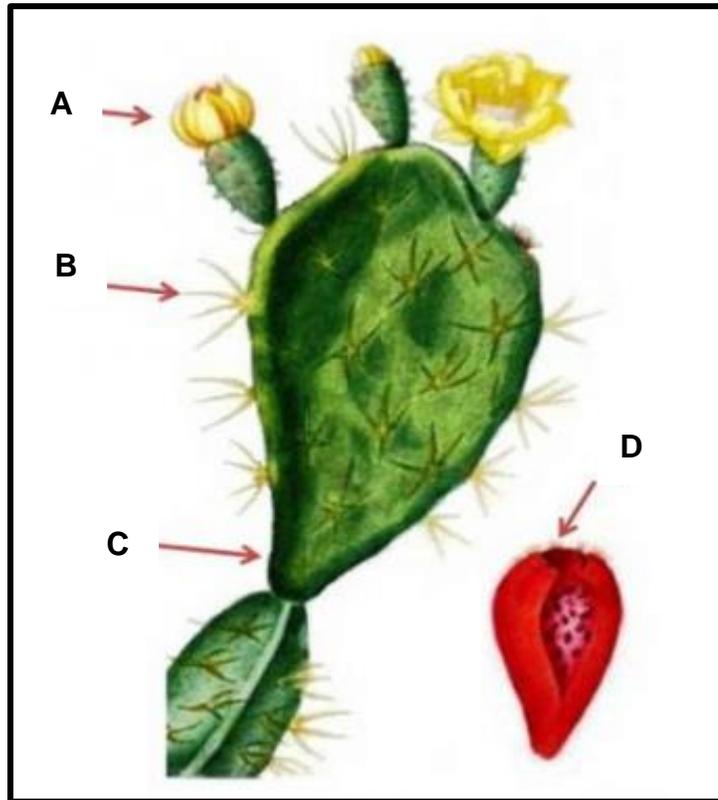
De las más de 300 especies del género *Opuntia*, únicamente de 10 a 12 de ellas, han sido aprovechadas por el hombre. Su uso es principalmente para alimentación, tanto su fruto (tuna) como cladodio entero (penca) y cladodio picado en pequeños trozos (nopalitos) (**Figura 3**); otras aplicaciones son como forraje (ganado vacuno y ovino) e industrialmente en la obtención de alcohol, colorantes (Cochinilla), jabón, pectinas y aceites. Estudios más recientes le han atribuido propiedades medicinales ya que posee efecto hipoglucemiante (Aguilar y col 2008).

### **b. Producción de nopal**

México es el principal productor de nopal (90%) en el mundo y el consumidor más importante en su forma fresca y procesada, siendo la producción anual superior a las 872 mil toneladas para el año 2022 (SIAP 2023). El estado de Morelos se mantuvo como el principal productor, seguido por la Ciudad de México y en tercera posición el Estado de México (SIAP 2022).

### **c. Composición química y aspectos nutricionales**

Los cladodios tiernos, usualmente llamados nopalitos, son consumidos como hortaliza fresca, son usados en una gran variedad de platillos, incluyendo salsas, ensaladas, sopas, botanas, encurtidos, bebidas, dulces y postres (Saenz y col 2012). Los principales componentes de los cladodios son polímeros que contienen



**Figura 3.** Partes constitutivas del nopal. **(A)** Cladodio o penca, **(B)** Espinas, **(C)** Flor, **(D)** Fruto (Saenz y col 2012).

carbohidratos, que comprenden una mezcla de mucílago y pectina. La composición química del nopal fresco fue reportada por Saenz y col (2012): humedad 91%, carbohidratos totales 4.5%, proteínas 1.5% (en base seca [bs]), grasas 0.2% (bs) y cenizas 1.3% (bs), de las cuales el 90% es calcio. Adicionalmente, 100 g de nopal contienen 11 mg de vitamina C y 30 µg de carotenoides (Guevara-Figueroa y col 2010).

Se considera a *Opuntia ficus indica* como un alimento que tiene alto valor nutricional, esto se debe a su alto contenido en fibra dietaria, minerales, fitoquímicos y proteínas (Bensadón y col 2010). Es bajo en calorías, aporta solamente 27 kcal/100 gramos. De cada 100 gramos de nopal fresco, de 1 a 2 gramos son fibra, y 0.17 gramos son fibra soluble. La fibra insoluble, que es el resto de la fibra (aproximadamente 1.7 gramos/ 100 gramos de nopal fresco), ayuda a evitar el estreñimiento en las personas que consumen la penca. El nopal posee propiedades antioxidantes, dadas por su contenido de beta-caroteno, polifenoles y vitamina C (Medina-Torres y col 2013).

El mucílago es un polisacárido, puede ser encontrado en células almacenadoras especializadas o libre en los espacios intercelulares de los tejidos parénquima y clorénquima de los cladodios. El mucilago seco contiene en promedio: 5.6% de humedad; 7.3% de proteínas; 37.3%; calcio 9.86%; potasio 1.55% (Sepúlveda y col 2007). Con base en su composición química, el mucílago es considerado un polímero (similar a la pectina) compuesto de arabinosa, galactosa, xilosa y rhamnosa como azúcares neutrales, y de una pequeña cantidad de ácido galacturónico (Medina Torres y col 2000; Madjoub y col 2001). Además del consumo directo de nopalitas, los cladodios maduros se deshidratan y muelen para obtener harina y otros productos. La harina de nopal es una fuente rica en fibra dietaria que alcanza hasta 43% en base seca (Saenz y col 2012). Esta harina puede usarse en la preparación de galletas,

pudding y en algunos países, especialmente México, cereales para el desayuno o tortillas. También puede ser usado en la producción de suplementos alimenticios (cápsulas, tabletas, etc.).

Rodríguez-García y col (2007) observaron que durante el desarrollo de los cladodios jóvenes la fibra insoluble incrementó (de 29.87% en cladodios de 60 g a 41.65% en cladodios de 200 g); mientras que la fibra soluble decreció (de 25.22 a 14.91%, respectivamente). Ayadi y col (2009) prepararon harina usando pencas de 2-3 años; la fibra dietaria total fue de 51.24%, de la cual 34.58% fue fibra insoluble y 12.98% fibra soluble. Este tipo de harinas puede tener una contribución nutricional para varios productos alimenticios incrementando el consumo diario de fibra dietaria.

#### **d. Compuestos bioactivos y propiedades nutraceuticas**

La planta de nopal es también una fuente importante de sustancias bioactivas y un excelente candidato para la preparación de alimentos funcionales y nutraceuticos. Todas las partes de la planta del nopal son ricas en miembros de la familia de los polifenoles, como varios flavonoides y ácidos fenólicos (El-Mosfata y col 2014) **(Cuadro 3)**.

Guevara Figueroa y col (2010), analizaron cladodios de nopales cultivados y silvestres de México y evaluaron los perfiles de polifenoles y flavonoides presentes en muestras frescas y en productos procesados. Se observó la presencia de cinco flavonoides principales (isoquercetina, isorhamnetina-3-O-glucósido, nicotiflorina, rutina y narcisina) en todas las variedades, siendo predominante la nicotiflorina.

Los cladodios del nopal son ricos en nicotiflorina que, mediante mecanismos antiinflamatorios y neuroprotectores, ha demostrado bajar la incidencia del infarto cerebral, atenuar los déficits neurológicos inducidos por la isquemia y regular al alza

**Cuadro 3.** Contenido de fenoles y flavonoides en nopal

<b>Componente identificado</b>	<b>Contenido en mg/ 100 g</b>
Ácido gálico	0.64–2.37
Ácido cumárico	14.08–16.18
3,4-dihidroxibenzoico	0.06–5.02
4-hidroxibenzoico	0.5–4.72
Ácido ferúlico	0.56–34.77
Ácido salicílico	0.58–3.54
Isoquercetina	2.29–39.67
Isorhamnetina-3-O-glucósido	4.59–32.21
Nicotiflorina	2.89–146.5
Rutina	2.36–26.17
Narcisina	14.69–137.1

(Gallegos- Infante y col 2009; Ginestra y col 2009; Bensadón y col 2010; Guevara-Figueroa y col 2010; Valente y col 2010)

la óxido nítrico sintasa endotelial en células endoteliales vasculares cerebrales de rata cultivadas (Li y col 2006).

La nicotiflorina es neuroprotectora contra la muerte de células ganglionares retinianas inducida por hipoxia, glutamato o estrés oxidativo a concentraciones nanomolares (Nakayama y col 2011).

Se reportan en literatura diversas investigaciones sobre el alto contenido de compuestos fenólicos en todas las partes del nopal (cladodios y frutas), se ha demostrado que poseen capacidad antioxidante, anticarcinogénica y antiviral, entre otras propiedades. En la tuna (fruta) se conocen diferentes variedades de distintos colores, con un alto contenido de carotenoides y polifenoles, que pueden tener un efecto benéfico en la salud (Feungang y col 2006).

El consumo de nopal ha ido al alza en los últimos años, debido a las propiedades nutraceuticas que este aporta (Santiago-Lorenzo y col 2016).

La planta de nopal ha sido usada por civilizaciones antiguas por miles de años para tratar enfermedades y curar heridas. Los orígenes y la historia del nopal como medicina están por lo tanto ligados a las antiguas civilizaciones latinoamericanas (Nazareno 2018). Por más de 12 000 años los nopales tiernos han sido consumidos por los mexicanos por sus cualidades nutritivas y propiedades curativas. Los cladodios, las frutas, semillas y flores han sido usados en la medicina tradicional en varios países a través de los siglos (Nazareno 2018).

Varios estudios han demostrado que los frutos y cladodios del nopal poseen altos niveles de nutrientes importantes, minerales y vitaminas, así como antioxidantes. La planta de nopal parece ser una fuente excelente de fitoquímicos de importancia nutraceutica (El-Mostafa y col 2014). Esta planta puede ser completamente utilizada

dado que es factible de extraer compuestos bioactivos de sus diferentes partes: flores, frutos, semillas, cladodios y raíces (Nazareno 2018). El **Cuadro 4** resume las propiedades nutraceuticas más relevantes asociadas al consumo de nopal.

El nopal (*Opuntia ficus indica*) es considerado un hipoglucemiante natural, ya que, es usado de manera cotidiana para disminuir los niveles de glucosa en sangre, esto es debido a su alto contenido de fibra dietaria soluble y pectinas, afectando de manera positiva en la absorción de la glucosa a nivel intestinal. En investigaciones realizadas en animales, reportan una baja en los niveles de glucosa postprandial en conjunto con la insulina (Yeh y col 2003).

Por otro lado, la combinación de fibra dietaria y su alto nivel de fitoquímicos descritos en el nopal, en conjunto con sus propiedades nutraceuticas, le otorgan al nopal el papel ideal para que pueda usarse como suplemento dietético y/o como ingrediente alimenticio. Los cladodios deshidratados del nopal constituyen un material fibroso, cuya función medicinal se basa, como cualquier otra fibra natural, en favorecer el proceso digestivo, disminuyendo el riesgo de alteraciones gastrointestinales y favoreciendo en los tratamientos contra la obesidad. Adicionalmente, la fibra disminuye el nivel de lípidos en sangre, es decir, lipoproteínas de baja densidad y colesterol al interferir en la absorción de grasas que realizan los intestinos (Bensadón y col 2010).

Galati y col (2003), afirmaron que cuando se les suministraron cladodios (*O. ficus-indica*) a ratas hipercolesterolémicas, se encontró una marcada disminución de los niveles de colesterol y triglicéridos en muestras de plasma.

Además de un efecto antihiperlipidémico y de reducción del colesterol fue también observado en conejillos de indias, ratas y ratones.

**Cuadro 4.** Propiedades nutracéuticas asociadas al consumo de nopal

<b>Propiedad</b>	<b>Sistemas estudiados</b>
Acción antiviral	Inhibición de la replicación viral intracelular e inactivación extracelular del virus (Ahmad y col 1996).
Efecto antihiperlipidémico y reducción del nivel de colesterol	Conejillos de indias (Fernández y col 1994). Ratas (Galati y col 2003).
Factor antiobesidad	Ratas (Ennouri y col 2007).
Efectos hipoglucemiantes y antidiabéticos	Humanos (Fрати- Munari y col 2004). Ratas diabéticas (Enigbocan y col 1996).
Acción antiinflamatoria	Ratas diabéticas (Yang y col 2008). Células macrófagas productoras de ácido nítrico (Cho y col 2006).
Neuroprotección	Rata pleurisia (Allegra y col 2014). Células primarias corticales cultivadas (Dok -Go y col 2003).
Reducción del efecto del estrés oxidativo	Estudios in vitro de células corticales de ratón cultivadas y estudios in vivo en gerbillos (Kim y col 2006). Humanos; LDL humano in vitro, células humanas in vivo (Tesorieri y col 2004, Budinsky y col 2001).
Propiedades preventivas del cáncer	Células epiteliales cervicales y de ovarios, así como ovario, cervicales, cancerosas de la vejiga (Zou y col 2005). Células cancerosas del ovario (Feugang y col 2010). Líneas celulares de leucemia (Sreekanth y col 2007). Células cancerosas de próstata, colon, mamarias y hepáticas (Chávez-Santoscoy y col 2009). Reducción en el número de papilomas e hiperplasia epidermal en ratones (Lee y col 2012).
Incremento de densidad ósea	Ratas (Kang y col 2012).
Mejoramiento de la sensibilidad a la insulina	Ratas (Kang y col 2013).

Galati y col (2002) propusieron que los cladodios de *O. ficus-indica* estimulan la respuesta protectora de la mucosa gástrica, previniendo el desarrollo de úlceras inducidas por el etanol (tratamiento preventivo). El efecto citoprotector de los cladodios de nopal fue adscrito a las propiedades fisicoquímicas del mucílago. Los cladodios de *O.ficus-indica* producen cito protección incrementando la secreción de moco en la mucosa gástrica de ratas afectadas por úlceras inducidas por alcohol. La administración de cladodios es recomendada como tratamiento preventivo y curativo de úlceras gástricas (Lee y col 2002).

Por otro lado, el consumo de nopal redujo la obesidad y la glucosa de la sangre, el factor antiobesidad, la acción hipoglucemiante y efectos antidiabéticos fueron observados en ratas y humanos (Yang y col 2008).

Un extracto de cladodio de *O. streptacantha* exhibió propiedades antivirales contra virus ADN, tales como el del herpes, y contra virus ARN tales como el de la influenza tipo A y el virus de la inmunodeficiencia adquirida (HIV1). El principio activo fue localizado en el tejido exterior no cuticular adscrito a una proteína con modo de acción desconocido. La replicación de ambos virus - ADN y ARN- fue inhibida. Existe una patente internacional (Patente internacional (1993): Skinner y Ezra (GB, Israel). Nopal cactus effect on herpex simplex and influenza A viruses) que sostiene que el nopal posee un efecto contra los virus del herpes simplex y de la influenza A, se ha propuesto que los derivados de la clorofila son los compuestos activos (Ahmad y col 1996).

## **D. TECNOLOGÍA DE EXTRUSIÓN**

### **1. Generalidades**

La extrusión puede definirse como un proceso que involucra el transporte de un material, bajo ciertas condiciones controladas, forzándolo a pasar por una boquilla de

una dada geometría y con un caudal másico pre-establecido, durante este transporte se produce la cocción parcial o total de los componentes de la mezcla (González y col 2002). El primer registro sobre su aplicación es de 1797 cuando Joseph Bramah utilizó un artefacto con un pistón para elaborar tubos de plomo sin costura. A mediados de 1930 los extrusores se utilizaron para mezclar harina y agua, y formar productos de pasta; años después esta tecnología se utilizó para producir el primer “cereal instantáneo para el desayuno” (harina de avena precocida) (Bhattacharya y col 1987). La cocción por extrusión generalmente se refiere a la combinación del calentamiento de productos en el extrusor para crear un producto cocinado y con forma. Materiales crudos, como harinas, almidones, proteínas, sal, azúcar y otros ingredientes minoritarios son mezclados, cortados y cocinados para formar una masa semejante a un plástico.

El calor se aplica directamente por inyección de vapor o indirectamente a través de una chaqueta que se encuentra en el extrusor o por la conversión de la energía mecánica. La temperatura final del proceso puede ser hasta de 230 °C; el tiempo de residencia es relativamente corto con tiempos de 10-60 s. La cocción por extrusión se reconoce como un proceso de temperatura alta-tiempo corto (HTST por sus siglas en inglés) (Mercier 1989).

Este procesamiento minimiza la degradación de nutrimentos por la acción del calor y mejora la digestibilidad por la gelatinización y desnaturalización parcial/total de almidón y proteínas, respectivamente; también destruye la mayoría de los factores antinutricionales de la materia prima (Fellows 2000).

La extrusión se ha utilizado para la fabricación de varios tipos de alimentos, como pastas alimenticias, botanas, cereales para desayuno, productos de confitería, harinas precocidas, bebidas y proteínas vegetales texturizadas.

## **2. Valor nutrimental de los productos extrudidos**

Las condiciones de altas temperaturas, presión y cizallamiento al que se somete cualquier materia prima durante el proceso de extrusión pueden producir los siguientes cambios en su composición química: 1) modificaciones de la red nativa de las macromoléculas por gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas, 2) formación de enlaces cruzados intermoleculares, 3) formación de almidón resistente (Unlu y Faller 1998), y 4) degradación de vitaminas y pigmentos. Sin embargo, la extrusión es preferible a otras técnicas de procesamiento de alimentos debido a la retención significativa de nutrientes, destrucción de factores antinutricionales, incremento de fibra dietaria soluble y reducción en la oxidación de lípidos (Singh y col 2007).

La digestibilidad de las proteínas es mayor en los productos extrudidos comparados con los productos sin extrudir. Esto pudiera deberse a la desnaturalización de las proteínas y la inactivación de los factores antinutricionales que impiden su digestión. En general, la cocción por extrusión es la destrucción de factores antinutricionales, especialmente inhibidores de tripsina, taninos y fitatos, los cuales pueden ser la causa de la inhibición de la digestibilidad de las proteínas, lo que facilita la acción de enzimas proteolíticas (Milán-Carrillo y col 2012).

## **3. Proceso de elaboración de pastas libres de gluten**

El desarrollo de pastas libres de gluten, no es un proceso simple, ya que es necesario crear una matriz homogénea y lo suficientemente cohesiva para soportar el

proceso de cocción y conferir atributos de calidad para el producto final (Giménez y col 2013). En una matriz libre de gluten, el almidón contribuye sustancialmente a la estructura final y a la calidad de la pasta, a medida que se convierte en parte de una compleja matriz, debido a sus modificaciones tales como la gelatinización, retrogradación y dextrinización (modificación física, mediante la cual se rompen grandes cadenas de almidón en unidades más pequeñas), así como a las interacciones con otros componentes (almidón-proteína-lípido-polisacárido), que son promovidas por los procesos mecánicos y térmicos que intervienen durante la fabricación. Estas modificaciones permiten la formación de una red tridimensional continua de amilosa retrogradada y otras estructuras, como cristales complejos amilosa-lípidos, que estabilizan la red (Mariotti y col 2011; Giménez y col 2013).

Mientras que las proteínas del gluten juegan un papel clave en las propiedades de pastas convencionales de sémola, el almidón es el componente determinante en pastas sin gluten, reorganizando la estructura macromolecular de manera eficaz, dando una textura similar a la encontrada en los productos de sémola (Marti y Pagani 2013). Básicamente, en las pastas libres de gluten, el papel del gluten podría ser sustituido por la elección de formulaciones adecuadas utilizando harinas tratadas con calor como los ingredientes clave, o mediante la adopción de procesos de pasta no convencionales para inducir nuevos reordenamientos de las macromoléculas de almidón.

La cocción por extrusión es una de las tecnologías más adecuadas para la fabricación de pastas libres de gluten. El principal fenómeno asociado con la cocción por extrusión utilizada y explotada en la fabricación de pastas libres de gluten es, nuevamente, la gelatinización del almidón. La organización de los gránulos de almidón

se interrumpe para hacerla de fácil digestión y para obtener un producto suave. En otros términos, las macromoléculas de almidón cristalino se transforman en un material más amorfo (Wolf y col 2010).

Matos-Segura y col (2013) reportaron que la producción de pastas alimenticias tradicionales se basa en la preparación de una masa obtenida al mezclar la harina de trigo duro (semolina) con agua y posteriormente el procesamiento por extrusión, para obtener la forma y dimensión de la pasta deseada. Mientras que, en la pasta libre de gluten, la ausencia de éste se puede anular con la mezcla de almidón pregelatinizado y harina de maíz o arroz sin pregelatinizar antes de adicionar el agua, o bien pregelatinizando parte del almidón durante el mezclado o durante el proceso de extrusión. Otra opción ha sido la utilización de temperaturas muy elevadas durante el proceso de secado de la pasta para desnaturalizar las proteínas y mantener la integridad de la pasta durante la cocción.

#### **4. Investigaciones recientes de pastas alimenticias sin gluten elaboradas por extrusión**

Diversos autores han investigado el efecto de la extrusión sobre la elaboración de pastas libres de gluten:

Giménez y col (2013) caracterizaron nutricionalmente fideos tipo espaguetis obtenidos por extrusión-cocción a partir de mezclas maíz/haba y maíz/quínoa, siendo las mezclas utilizadas harina maíz/quínoa (M/Q) 80:20 y maíz/haba (M/H) 70:30. Los fideos mejorados nutricionalmente mostraron un incremento significativo de macro y micronutrientes, así como también de la utilización proteica neta (UPN) y valor Biológico (VB), y una ligera disminución en la digestibilidad (D) respecto a la harina de maíz pura utilizada como control. De acuerdo con los autores, una porción de estos

fideos aportó 10-20% del valor diario recomendado de fibra dietaria. Además, el agregado de harinas de habas y quínoa a sistemas farináceos sin gluten permitió obtener fideos con características tecnológicas adecuadas y calidad nutricional mejorada.

Fiorda y col (2013) realizaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar la calidad (color, textura y valor nutricional) de pastas alimenticias sin gluten formuladas con harina pregelatinizada a base de almidón de yuca y bagazo de yuca (70:30), almidón de yuca y harina de amaranto. Compararon el valor nutricional del producto que presentó mejores características de textura con el de las pastas comerciales elaboradas con sémola y con harina integral. El uso de la harina pregelatinizada, almidón de yuca nativa y harina de amaranto (10:60:30), respectivamente, permitió desarrollar un producto con color, textura y valor nutricional adecuados de calidad similar a los productos comerciales de trigo. Es decir, de color amarillento claro, rico en fibra [9.37 g (100 g)<sup>-1</sup>], en proteína [10.41 g (100 g)<sup>-1</sup>], firmeza adecuada (43.6 N) y baja pegajosidad (3.2 N). El uso de bagazo de yuca aumentó el contenido de fibra del producto y podría usarse como ingrediente en la formulación de la pasta. Además, afirmaron que la pasta obtenida podría contribuir a incrementar la disponibilidad de productos sin gluten, más saludables en el mercado.

Rodríguez-Ferreira y col (2016) estudiaron el uso de harina de sorgo en la producción de una pasta sin gluten por medio de extrusión-cocción, para pacientes con enfermedad celíaca. Se utilizaron diferentes tipos de harinas sin gluten, como el sorgo, el arroz, el maíz y el almidón de papa. La pasta tipo espagueti obtenida en este estudio, que contenía harinas de sorgo, arroz y papa (proporción de 40:20:40), fue la

muestra que presentó los mejores resultados en las pruebas de calidad de cocción. Esta formulación mostró la mejor densidad, rendimiento, aumento de peso y la menor pérdida de sólidos.

Menga y col (2016) elaboraron una pasta alimenticia libre de gluten a base de arroz adicionada con semillas y mucílagos de chía, con el objetivo de reducir el índice glucémico de los alimentos sin gluten, mediante la introducción de materias primas ricas en fibra y proteínas. La investigación demostró que la chía puede representar un sustituto de hidrocoloides (que imitan la red del gluten) en la formulación de pasta sin gluten. Asimismo, afirmaron que sus resultados son alentadores, ya que han demostrado que es posible obtener una pasta sin gluten con características de cocción equivalentes a las que se pueden obtener en una pasta comercial sin gluten, según lo confirmado por los valores de firmeza en muestras cocidas. Además, con una concentración del 10% de mucílago o semillas de chía obtuvieron una pasta más nutritiva y saludable en comparación con las muestras de pastas comerciales libres de gluten, por el alto contenido de proteínas, fibra dietética y ácidos fenólicos.

Laleg y col (2017) estudiaron el reemplazo de harina de trigo por harina de habas en la elaboración de una pasta, obteniendo como resultado un aumento lineal concomitante en la pérdida de cocción (hasta 2.6 veces), una disminución en la capacidad de recuperación (hasta 1.4 veces) y un aumento de la digestión de proteínas *in vitro* (hasta un 25%). Además, reportaron que las puntuaciones para los atributos sensoriales como el gusto, atribuido a la pasta que contiene 100% de proteína de habas, fueron cercanas a las puntuaciones otorgadas a una pasta de trigo integral comercial. Las pastas producidas exclusivamente a partir de habas y secadas a 55 °C

o 90 °C presentaron una tendencia a ser más aceptadas que las pastas comerciales sin gluten.

Phongthai y col (2017) desarrollaron una pasta sin gluten a base de arroz enriquecida con proteínas de múltiples fuentes: albúmina de huevo, concentrado de proteína de suero, concentrado de proteína de soya y proteína de salvado de arroz. La albúmina de huevo manifestó el mayor potencial para mejorar la pasta sin gluten, ya que proporcionó un tiempo de cocción corto, una pérdida de cocción baja y una textura firme. Mientras tanto, el enriquecimiento de concentrados de proteína de soya dio atributos de color similares a la pasta comercial de trigo duro. De acuerdo con la baja pérdida de proteínas durante la cocción, ambas proteínas son apropiadas para usar como potenciadores nutricionales. Este estudio puede proporcionar una base científica para el desarrollo de pasta sin gluten a base de harina de arroz a escala comercial. Sin embargo, es necesario evaluar más a fondo otras preferencias estéticas de los consumidores por la pasta.

#### IV. JUSTIFICACIÓN

La enfermedad celíaca causa una inflamación crónica del intestino delgado provocando mala absorción de nutrientes que se desencadena y mantiene por la ingesta del gluten. Las pastas son un alimento de alto consumo, fácil preparación y larga vida de anaquel, además pueden ser un excelente vehículo para la incorporación de nutrientes, siendo así una buena opción para combatir la malnutrición y los síntomas típicos en las personas con esta enfermedad. En el afán de satisfacer las necesidades nutrimentales de personas con dicho padecimiento, se propone la utilización de cereales considerados inocuos como el arroz, además de aprovechar un subproducto altamente desperdiciado de la molienda de este cereal, conocido como arroz quebrado. De igual manera, se propone la utilización de harina de nopal, ya que presenta importante contenido de fibra dietaria y diversos compuestos bioactivos de gran interés, ya que se ha reportado que poseen actividad antioxidante, anticarcinogénica, hipoglucémica, hipocolesterolémica, entre otras. La tecnología de extrusión es uno de los métodos más utilizados en la industria para la elaboración de pastas, que destaca por ser un proceso alta temperatura-corto tiempo, lo que pudiera disminuir la afectación de las propiedades nutraceuticas. Por otro lado, se encontró que existen pocos trabajos científicos sobre la utilización de este tipo de materias primas en la elaboración de pastas alimenticias con propiedades nutraceuticas y nutrimentales, y no se encontraron reportes sobre la utilización del subproducto de la molienda de arroz. Por lo anterior, el presente estudio tuvo como finalidad generar información científica y tecnológica inédita mediante la obtención por extrusión de una pasta alimenticia libre de gluten con buenas propiedades fitoquímicas.

## **V. HIPÓTESIS**

Las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas por extrusión a base de arroz quebrado, adicionadas con harina de nopal, presentan propiedades físicas, fisicoquímicas, fitoquímicas, nutraceuticas, nutrimentales y sensoriales similares o mejores a pastas comerciales.

## VI. OBJETIVOS

### A. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto de las condiciones de extrusión y de la adición de harina de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) sobre propiedades de cocción, nutrimentales, sensoriales y potencial nutracéutico de pastas alimenticias libres de gluten, a base de arroz quebrado.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar análisis químicos, fitoquímicos y nutrimentales en las materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas alimenticias obtenidas por extrusión.
2. Estudiar el efecto de la temperatura de extrusión (TE), contenido de humedad (H) y contenido de harina de nopal (CN) sobre las propiedades físicas (parámetro de color  $\Delta E$ ) y fisicoquímicas (ISA, IAA).
3. Evaluar propiedades de cocción (tiempo de cocción, aumento de peso, aumento de volumen, pérdidas de sólidos por cocción) de las pastas alimenticias libres de gluten obtenidas en los diferentes tratamientos.
4. Evaluar el efecto de los factores de estudio (TE, H y CN) sobre las propiedades fitoquímicas (clorofilas totales, compuestos fenólicos (libres, ligados, totales), antioxidantes (DPPH, ABTS, Deoxi-D-Ribosa), y biológicas (inhibición de la oxidación de las LDL) de pastas alimenticias libres de gluten.
5. Realizar un estudio de optimización del proceso de extrusión utilizando la metodología de superficie de respuesta (MSR), y validar los valores predichos por el modelo.
6. Determinar características nutrimentales en relación a perfil de aminoácidos esenciales (AAE), digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV), fibra dietaria (FD),

perfil de minerales, contenido de gliadinas e índice glicémico de las pastas alimenticias obtenidas en condiciones óptimas de procesamiento.

7. Realizar un análisis sensorial en las pastas alimenticias obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento y su comparación con un producto comercial, en relación a su aceptabilidad general y por atributos.

## **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **A. MATERIALES**

#### **1. Materias primas**

Las materias primas que se utilizaron en la elaboración de las pastas alimenticias libres de gluten, fueron, arroz quebrado, que es un subproducto obtenido del proceso de refinamiento de arroz blanco (Grupo ÁNSERA S.A. de C.V., Culiacán, Sinaloa, México), el cual fue molido (Molino Pulvex 200, Ciudad de México) hasta obtener un tamaño de partícula  $< 420 \mu\text{m}$ . Asimismo, se utilizó harina de nopal (Viva Verde, Hermosillo, Sonora, México). Las materias primas se almacenaron en refrigeración ( $\sim 5^\circ\text{C}$ ) en bolsas de plástico negro para resguardarlas de la luz hasta su utilización.

### **B. MÉTODOS**

#### **1. Proceso de extrusión**

##### **a. Obtención de pastas alimenticias**

El proceso de extrusión se llevó a cabo en un extrusor de dos tornillos (marca Shandong light, modelo LT32L, China). Se empleó un dado de salida con 2 aberturas circulares, con medidas de 2 mm de diámetro interno, y con tornillos con una relación de compresión 2:1. La concentración harina de nopal (HN) fue variada, de acuerdo al diseño experimental, de 1.91 a 22.09%. Durante todos los tratamientos, las temperaturas se mantuvieron constantes en la zona de alimentación y en la matriz de salida a 75 y 80 °C, respectivamente, mientras que la temperatura (TE) de la zona de mezclado/cocción fue variada, de acuerdo al diseño experimental, de 88.5 a 125.5 °C, mientras la velocidad de tornillo (VT) se mantuvo constante a 111 rpm. Las diferentes muestras de harina empleadas durante el proceso de extrusión con un peso de alrededor de 1500 g por tratamiento, fueron ajustadas a la humedad deseada en un

rango de 21.27 a 34.73% de acuerdo con el diseño experimental, usando una batidora de laboratorio (KitchenAid, Model K5SS, Michigan, USA). La **Figura 4** 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 químicos**

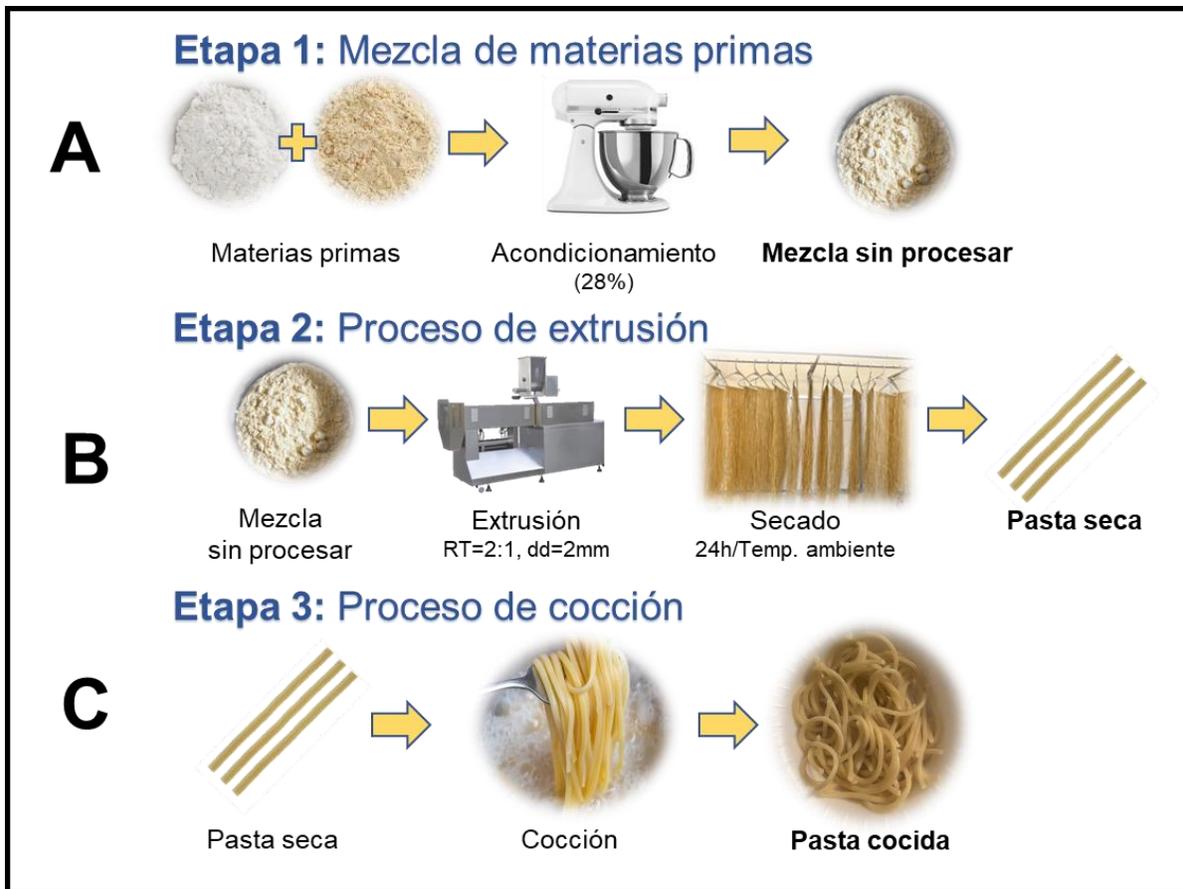
### **a. Composición proximal**

Se llevaron a cabo los análisis de composición proximal en las materias primas (harina de arroz quebrado (HAQ) y harina de nopal (HN)) que se utilizaron para la elaboración de los diferentes tratamientos, previamente se molieron estas materias primas y se cribaron en un tamiz de malla 40, para obtener materiales con un tamaño de partícula menor de 0.42 mm. Estos análisis se realizaron de acuerdo con los métodos oficiales de la AOAC (2012) para proteínas (960.52), grasas (920.39), cenizas (923.03), humedad (925.10), fibra cruda (962.09), mientras que el contenido de carbohidratos se determinó por diferencia.

## **3. Métodos físicos**

### **a. Índice de absorción de agua (IAA)**

Se llevó a cabo siguiendo la metodología 54-21 descrita por la AACC (2010), con ligeras modificaciones. Se pesó 1 g de muestra de harina de las materias primas y de las pastas alimenticias libres de gluten y se suspendió en 12 mL de agua a 25 °C en un tubo tarado para centrífuga de 15 mL, el cual se llevó a agitación a una velocidad moderada en un homogenizador (Vari-Mix Aliquot Mixer, Modelo M48725) durante 30 min. Después, la suspensión fue centrifugada en un equipo (Eppendorf, 5804R)



**Figura 4.** Etapas de procesamiento para la obtención de pastas alimenticias libres de gluten a partir de arroz quebrado y harina de nopal, y materiales obtenidos en las diferentes etapas **(A)** mezcla, **(B)** extrusión, **(C)** cocción.

a 3200 x g durante 30 min, a una temperatura de 25 °C. El líquido sobrenadante se decantó con precaución en un recipiente tarado de vidrio para llevar a cabo la determinación del contenido de sólidos. Se formó un gel y este se pesó y el índice de absorción de agua se calculó mediante la relación g de agua absorbida/g de sólidos secos. Los análisis para cada una de las muestras se realizaron por triplicado.

#### **b. Índice de solubilidad en agua (ISA)**

Se obtuvo de la cantidad de sólidos secos recuperados por la evaporación del sobrenadante, obtenido de la determinación del IAA. Los sólidos solubles en agua se expresaron como el porcentaje de sólidos secos recuperados en 1 g de muestra. Las determinaciones se realizaron por triplicado (AACC 2010).

#### **c. Parámetro de color**

El parámetro de color se determinó en las materias primas, mezclas sin procesar, y muestras procesadas, utilizando un colorímetro triestímulo marca Minolta (CR-210, Tokio, Japón). Se tomaron las muestras, se molieron y se cribaron utilizando un tamiz de malla 60 marca Fisherbrand. Se colocaron las muestras en una caja Petri de laboratorio de 5 cm de diámetro, realizándose cinco mediciones, 4 equidistantes y una en el centro, reportándose el valor promedio de estas. Se registraron los valores L\* [(luminosidad, de 0 (oscuro) a 100 (claro))], a\* [(de -60 (verde) a +60 (rojo))], y b\* [(de -60 (azul) a +60 (amarillo))]. Asimismo, se calcularon los parámetros  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$ , los cuales indican la diferencia de color entre los tratamientos sin procesar con respecto a las pastas obtenidas por extrusión, calculándose la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) mediante la siguiente ecuación:

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

## **4. Propiedades de cocción**

### **a. Tiempo de cocción**

Se define como el tiempo requerido para obtener un producto “al dente”, conociéndose este como el momento en el cual desaparece la zona blanquecina que se forma en el interior de la pasta, correspondiente al almidón del endospermo, que aún permanece sin gelatinizar. Para llevar a cabo este análisis, 25 g de muestra (trozos de 5 cm) se sumergieron en 300 mL de agua destilada a temperatura de ebullición, una vez pasados 30 s, una cinta de pasta fue sacada del recipiente de agua a temperatura de punto de ebullición (~ 98 °C), y se colocó en un recipiente con agua a temperatura ambiente para frenar el cocimiento de la pasta. Una vez enfriado el trozo de muestra, se colocó en una hoja de papel de color oscuro y con el apoyo de una lámina de vidrio fue presionada suavemente, para poder ver el punto blanco, esta operación fue repetida cada 30 s hasta obtener el punto “al dente”. Se realizaron por triplicado las determinaciones para cada tratamiento.

### **b. Aumento de peso (AP)**

Se utilizaron 25 g de muestra de cada uno de los tratamientos, los cuales fueron cortados en pedazos de 5 cm de longitud y se cocinaron hasta el tiempo óptimo de cocción en 300 mL de agua destilada hirviendo (~ 98 °C). Luego, se escurrió el agua y las pastas fueron sumergidas una vez más en un volumen de 50 mL de agua a temperatura ambiente (~ 25 °C) durante un minuto, al final del cual se escurrieron y al momento de alcanzar la temperatura ambiente se pesaron. Este parámetro se calculó en términos de porcentaje, calculando la diferencia de peso entre las muestras antes de la cocción (pastas secas), y después de la cocción, y dividiendo el resultado entre

la masa inicial de las pastas. Se realizaron mediciones por triplicado para cada uno de los tratamientos.

### **c. Aumento de volumen (AV)**

Este parámetro se realizó utilizando 50 mL del solvente hexano en una probeta de 100 mL. La relación entre el volumen de solvente desplazado por la pasta cocida (10 g) se utilizó como guía para la determinación del aumento de volumen, realizándose repeticiones por triplicado por cada tratamiento.

### **d. Pérdidas de sólidos por cocción (PSC)**

Para la realización de estos análisis, se utilizó el agua de cocción obtenida en la prueba de “aumento de peso”, la cual fue recolectada en vasos de vidrio a peso constante, y posteriormente evaporada en una estufa a 105 °C, por 24 hr. El residuo resultante fue pesado y se reportó como porcentaje de pérdidas con base 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).

## **6. Evaluación de las propiedades fitoquímicas y funcionales**

### **a. Clorofilas totales**

El contenido de clorofilas totales se determinó de acuerdo a la metodología descrita por Hiscox e Israelstam (1979). Se pesaron 0.5 g de muestra y se adicionaron 5 mL de acetona al 80%, posteriormente se centrifugó a 2000 rpm por 10 minutos, el sobrenadante se separó y se ajustó cada tubo a 6 mL con acetona al 80%, se tomó 1 mL del sobrenadante de cada uno de los extractos y se diluyó hasta 5 mL con acetona al 80%. Se midió la absorbancia en un espectrofotómetro a longitudes de onda de 645 y 663 nm utilizando acetona al 80% como blanco. El resultado de clorofilas totales se expresó como mg/100 g bs de clorofilas totales.

## **b. Determinación de fitoquímicos**

### **1) Extracción de compuestos fenólicos libres**

La extracción de fitoquímicos libres se realizó de acuerdo con Adom y Liu (2002) y Moore y col (2005), partiendo de muestra desgrasada. Se partió de 1 g de muestra con 10 mL de etanol al 80% (v/v), se agitaron durante 10 min y se centrifugaron a 3,000xg/10 °C/10 min, este proceso se realizó cuatro veces. El sobrenadante se concentró a 40 °C a presión baja en un rotavapor (marca Heidolph, modelo laborota, 4011-digital, Alemania) hasta sequedad y se recuperó con 2 mL de metanol. Los extractos se almacenaron a 4°C hasta su posterior uso, para la determinación de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante correspondiente a fitoquímicos libres. El precipitado se almacenó para la obtención de los extractos fitoquímicos ligados.

### **2) Extracción de compuestos fenólicos ligados**

El precipitado obtenido de la extracción de fitoquímicos libres, se digirió con 10 mL de NaOH 0.5 M y se llevó a baño María a 60 °C/30 min, posteriormente se llevó a temperatura ambiente (25 °C) y se le añadieron con 2 mL de HCl concentrado. Los tubos se agitaron durante 10 min y se les agregaron 10 mL de acetato de etilo agitando nuevamente durante 10 min. Se centrifugó a 3,000xg/10 °C/10 min, se recuperó el sobrenadante y se agregó acetato de etilo nuevamente (3 veces), La fracción de acetato de etilo se evaporó hasta sequedad en el rotavapor, se recuperó el extracto con 2 mL de metanol. Los extractos se almacenaron a 4 °C hasta su posterior uso en la determinación de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante correspondiente a fitoquímicos ligados.

## **c. Compuestos fenólicos totales**

### **1) Preparación de la curva de calibración**

Se preparó una solución madre (1000 ppm), pesando 0.01 g de ácido gálico monohidratado y disolviéndolo en 10 mL de metanol. Posteriormente, se prepararon diluciones de 0.5, 10.5, 20.5, 30.5, 40.5 ppm para llevar a cabo la curva de calibración con el ensayo de Folin-Ciocalteu que se explica en el paso siguiente. La curva de calibración se realizó por triplicado.

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

Para efectuar el ensayo se utilizó el método Folin-Ciocalteu con modificaciones de la metodología reportada por Singleton, Orthofer y Lamuela-Raventos (1999). Para ello, se tomaron 30  $\mu$ L del extracto, 3 mL de agua destilada y 200  $\mu$ L de reactivo Folin-Ciocalteu y se colocaron en un tubo de ensayo dejando reaccionar por 10 min a temperatura ambiente (25 °C). Luego se agregaron 600  $\mu$ L de una solución de carbonato de sodio al 20% y se pasó a incubar durante 20 min a 40 °C en un baño con verificación de temperatura (Fisher Scientific, modelo 210, EUA). Se enfrió en un baño de hielo y el color desarrollado durante ese tiempo se midió a 760 nm en un espectrofotómetro Thermo Spectronic (modelo GENESYS 10 UV, serie 2H7G229001, EUA). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (mg EAG/g b.s.) de muestra. Lo anterior se realizó por triplicado para cada tratamiento.

## **d. Determinación de la Actividad Antioxidante ABTS**

### **1) Extracción de la muestra**

Para la realización de esta prueba, se empleó el mismo extracto utilizado en la determinación de compuestos fenólicos.

### **2) Medición de la actividad antioxidante**

Para la realización del ensayo se utilizó la metodología propuesta por Re y col (1999) con algunas modificaciones, la cual consiste en la preparación del radical catión  $ABTS^+$  mediante la mezcla de 5 mL de  $ABTS^+$  (7mM) y 88  $\mu$ L de  $K_2S_2O_8$  (140 mM). Dicha mezcla se dejó reposar por espacio de 16 horas a temperatura ambiente a total oscuridad para la generación óptima del radical. Una vez formado el radical, se ajustó la absorbancia a 0.70, manejando una longitud de onda de 734 nm para llevar a cabo el ensayo. Se pesaron 0.01 g de trolox disolviéndose en 10 mL de metanol, obteniendo una solución madre de 1000 ppm (1 mg/mL). Esto sirvió en la elaboración de soluciones para llevar a cabo la curva de calibración. Se tomaron 60  $\mu$ L de cada solución de trolox y se le adicionaron 1940  $\mu$ L del radical  $ABTS^+$  ajustado con la absorbancia de 0.7. De igual manera, se determinó la absorbancia ( $A_0$ ) de un control de 60  $\mu$ L de metanol y 1940  $\mu$ L de radical  $ABTS^+$ . Posteriormente, cada tubo se mezcló con vortex 10 s y se sometió a una agitación orbital por espacio de 10 min. Pasado el tiempo, se procedió a la lectura de la absorbancia ( $A$ ) a 734 nm para cada solución de trolox con el radical  $ABTS^+$ . El valor de la capacidad antioxidante equivalente trolox (CAET) se calculó mediante el análisis de regresión, utilizando la ecuación que

relaciona la concentración de trolox con la absorbancia. Los resultados se expresaron como  $\mu\text{mol ET/g}$  en base seca, realizando las mediciones por cuadruplicado.

#### **e. Determinación de la actividad antioxidante DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil)**

##### **1) Extracción de la muestra**

Para la realización de esta prueba, se empleó el mismo extracto utilizado en la determinación de compuestos fenólicos.

##### **2) Curva de calibración**

Para llevar a cabo la determinación de la AAO por el método de DPPH, se modificó la metodología propuesta por Kim y col (2002). Se pesaron 2.4 a 3 mg de radical DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil) y se aforaron a 100 mL con metanol, se ajustó la absorbancia del radical en un rango de 0.76-0.78 a 515 nm, que se utilizó para el ensayo. En la curva de calibración se relacionó la concentración de las diferentes diluciones contra el % de inhibición. Se pesaron 0.01 g de trolox y se aforó 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 la actividad antioxidante**

Para la medición de la actividad antioxidante en los diferentes tratamientos se determinó la absorbancia ( $A_0$ ) de un control con 100  $\mu\text{L}$  de metanol y 2900  $\mu\text{L}$  de radical DPPH. Asimismo, se adicionaron 100  $\mu\text{L}$  del extracto de la muestra y 2900  $\mu\text{L}$  del radical DPPH. Se dejaron reposar por 30 min en oscuridad y se leyó la absorbancia a 515 nm. La medición se realizó por cuadruplicado y los valores de capacidad

antioxidante fueron reportados en  $\mu\text{mol}$  equivalente trolox por gramo de muestra en base seca ( $\mu\text{mol}$  ET/g bs).

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

Este análisis se caracteriza por determinar la capacidad de captación del radical hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ). Dicho radical se genera a partir del peróxido de hidrógeno y una mezcla de ácido ascórbico y cloruro de hierro III y EDTA (reacción Fenton).

La metodología propuesta por Halliwell y col (1987) fue utilizada para llevar a cabo este ensayo. Se utilizó 1 mg de extracto de cada muestra y del estándar catequina, los cuales se disolvieron con 1 mL de una solución buffer de fosfatos, formándose soluciones con una concentración de 1000 ppm (1 mg/1mL), se realizó la curva de calibración a partir de la solución de catequina. Fueron colocados en tubos, 500  $\mu\text{L}$  de dilución, 100  $\mu\text{L}$  de deoxi-D-ribosa (28 mM), 200  $\mu\text{L}$  de solución premezclada de cloruro férrico: ácido etilén-diamino-tetracético (100  $\mu\text{L}$  de EDTA 1000  $\mu\text{M}$ , 100  $\mu\text{L}$  de  $\text{FeCl}_3$  1000  $\mu\text{M}$ ), 100  $\mu\text{L}$  de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 10 mM y 100  $\mu\text{L}$  de ácido ascórbico 1 mM.

Seguido, estos reactivos se agitaron en vortex e incubaron a 37 °C/1 h, se añadió 1 mL de ácido tricloroacético (TCA) 2.8% y 1 mL de ácido tiobarbitúrico (TBA) 1%, para posteriormente agitarse y calentarse en un baño de agua a 95 °C/20 min. Después, se detuvo la reacción enfriando las muestras (3–5 °C) durante 5 min en un baño con hielo, seguido de la adición de 2 mL de n-butanol a cada uno de los tubos y se agitaron durante 1 min en vortex, se centrifugaron a 3000  $\text{xg}/10$  min/25 °C y, para separar la fase orgánica de la acuosa. Se ajustó el espectrofotómetro con n-butanol y

posteriormente se utilizó como blanco (A0) la solución buffer de fosfatos en lugar de las muestras. Finalmente, la fase orgánica (rosa) se leyó a 532 nm. Los resultados se realizaron por triplicado, reportándose como % de atrapamiento del radical OH-, y calculándose 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. Evaluación del efecto biológico**

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

Este análisis es catalogado del tipo biológico, debido a que se utiliza plasma humano para la obtención de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), en donde se induce su oxidación, mediante esta prueba se determina la capacidad de captación del radical peroxilo (ROO-). Dicho radical se obtiene de la peroxidación de liposomas, emulando las membranas orgánicas a 37 °C en el sistema cloruro de hierro III y ácido ascórbico. Al igual que en el ensayo de deoxi-D-ribosa la adición del ácido tiobarbitúrico forma 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 la determinación del porcentaje de inhibición de la oxidación de las LDL, se empleó como base la metodología descrita por Loy y col (2002) con ligeras modificaciones. Se colocaron 10 mL de plasma sanguíneo humano y se agregó (1 mL)

un reactivo precipitante (HDL colesterol P-reagente precipitante, marca Spinreact, Girona, España), para la obtención de LDL. Después, la mezcla se centrifugó a 3000 xg/10 min/25°C. Las LDL a analizar se obtuvieron del pellet resultante de la centrifugación. Una vez recuperada la fracción de LDL, se realizaron diluciones con buffer de fosfatos a pH de 7.4 hasta una concentración de 1000 ppm. Se agregaron 300 µL de LDL en tubos de cristal de 5 mL, seguido se agregó una alícuota de 100 µL de muestra y 100 µL de sulfato cúprico (CuSO<sub>4</sub>) a 50 mM; después cada tubo se llevó a 1 mL con buffer de fosfatos a pH 7.4. La mezcla se agitó en vortex y fue incubada durante 3 h/37 °C, pasado el tiempo, se agregó 1 mL de ácido tricloroacético (TCA) al 15% y 1 mL de ácido tiobarbitúrico (TBA) al 0.37%. Se agitó en vortex y se calentó en un baño de agua en ebullición (100 °C) por 20 min. Se detuvo la reacción enfriando las muestras (3-5 °C) en un baño con hielo, posteriormente, se añadieron 2 mL de n-butanol a cada uno de los tubos, los cuales se centrifugaron a 3000 xg/10 min. Se ajustó el espectrofotómetro con n-butanol y se leyó la fase orgánica (rosa) a 532 nm. Para el blanco se siguió un procedimiento igual, pero con ausencia de la muestra. Esta determinación se realizó por triplicado, y los resultados fueron expresados como % de inhibición de las LDL, el cual se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ inhibición LDL} = \frac{\text{Absorbancia blanco} - \text{Absorbancia muestra}}{\text{Absorbancia blanco}} * 10$$

## 7. Métodos estadísticos

### a. Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental central, compuesto, rotatable, de segundo orden con un valor  $\alpha=1.682$  (**Cuadro 5**), en donde se tuvieron como variables independientes: temperatura de extrusión (TE, °C), contenido de humedad (H, %) y contenido de harina de nopal (CN, %), con cinco niveles cada una, dando un total de 20 tratamientos (**Cuadro 6**). Estos niveles de las variables independientes fueron elegidos de acuerdo a información bibliográfica y ensayos preliminares. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (MSR) para encontrar las condiciones óptimas de procesamiento, en los intervalos de las variables anteriormente mencionadas, que proporcionen una pasta alimenticia con buenas características de cocción y fitoquímicas.

### b. Análisis de datos

Para la regresión múltiple (MSR) y predicción del comportamiento experimental de los datos se utilizaron los modelos cuadráticos con el programa estadístico Design Expert (Stat-Ease, 2008), versión 11.0. El modelo matemático fue:

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

Donde  $Y_i$  es la respuesta genérica,  $X_1$  es la temperatura de extrusión (TE),  $X_2$  es el contenido de humedad (H) y  $X_3$  es el contenido de harina de nopal (CN); Asimismo,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_1^2$ ,  $b_2^2$ ,  $b_3^2$ ,  $b_1b_2$ ,  $b_1b_3$  y  $b_2b_3$  son los coeficientes de regresión.

**Cuadro 5.** Niveles de variación de las tres variables independientes, utilizadas en el diseño experimental: temperatura de extrusión (X1, TE), contenido de humedad (X2, H) y contenido de harina de nopal (X3, CN) ( $\alpha= 1.682$ ).

<b>Factores</b>	<b>-<math>\alpha</math></b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>+<math>\alpha</math></b>
<b>Temperatura de extrusión (°C)</b>	88.50	96	107	118	125.50
<b>Contenido de humedad (%)</b>	21.27	24	28	32	34.73
<b>Harina de nopal (%)</b>	1.91	6	12	18	22.09

**Cuadro 6.** Diseño experimental del estudio de extrusión de tres factores

Tratamientos	Variables independientes					
	Niveles codificados			Niveles decodificados		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	TE (°C)	H (%)	CN (%)
1	-1	-1	-1	96	24	6
2	1	-1	-1	118	24	6
3	-1	1	-1	96	32	6
4	1	1	-1	118	32	6
5	-1	-1	1	96	24	18
6	1	-1	1	118	24	18
7	-1	1	1	96	32	18
8	-1.682	1	1	118	32	18
9	1.682	0	0	88.50	28	12
10	0	0	0	125.50	28	12
11	0	-1.682	0	107	21.27	12
12	0	1.682	0	107	34.73	12
13	0	0	-1.682	107	28	1.91
14	0	0	1.682	107	28	22.09
15	0	0	0	107	28	12
16	0	0	0	107	28	12
17	0	0	0	107	28	12
18	0	0	0	107	28	12
19	0	0	0	107	28	12
20	0	0	0	107	28	12

TE= Temperatura de extrusión; H= Contenido de humedad; CN= Contenido de harina de nopal.

Las correlaciones de Pearson se determinaron utilizando el paquete estadístico Statistica 7.0 (Statsoft 2004), mientras que las comparaciones de medias se obtuvieron con la prueba LSD, usando el programa estadístico Design Expert (Stat-Ease, 2008) versión 11.0.

### **c. Optimización del proceso de extrusión**

Se aplicó el método numérico para encontrar la mejor combinación de factores del proceso de extrusión, en donde se pudieran obtener las pastas alimenticias tipo espagueti libres de gluten con las mejores propiedades de cocción, el mayor contenido de compuestos fenólicos, y la mayor capacidad para inhibir la oxidación de las LDL, utilizando el paquete estadístico Design Expert 11.0. Las variables dependientes que se utilizaron para la optimización fueron tiempo de cocción (TC), aumento de peso (AP), compuestos fenólicos totales (CFT), e inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de la fracción libre (LDLLib).

## **8. Métodos nutrimentales**

### **a. Fibra dietaria (FD)**

Los análisis de FD se realizaron según la metodología de la AOAC (2012), con el método 985.29 y ligeras modificaciones de Prosky y col (1988). Este ensayo se llevó a cabo en la pasta control sin nopal (PC), productos obtenidos en condiciones óptimas (sin procesar y procesados (PO)) y pasta de arroz comercial (PCA). La metodología se basa en la eliminación de almidón y proteínas mediante un kit de enzimas TDF-100<sup>a</sup> (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.). Se mezcló un gramo de la muestra con una solución tampón fosfato y se gelatinizó con  $\alpha$ -amilasa termoestable. Se llevó a cabo

una digestión con las enzimas proteasa y amiloglucosidasa, haciendo diferentes ajustes de pH en la solución sometida a calentamiento y enfriamiento. El residuo se lavó y filtró una vez más con agua, guardándose para su uso posterior. Además, el residuo se lavó de nuevo con etanol y acetona, seguido fue secado y pesado para obtener la fibra dietaria insoluble (FDI). Se adicionaron cuatro volúmenes de etanol al filtrado combinado y a los lavados con agua previamente guardados para precipitar la fibra dietaria soluble (FDS). El precipitado se filtró (Martin Cabrejas y col 1995), se lavó con etanol y acetona, se secó y se pesó. Se determinaron la proteína residual y las cenizas y los valores de FDI y FDS se informaron como porcentajes.

#### **b. Digestibilidad proteínica *in vitro***

Se determinó de acuerdo al procedimiento reportado por Rathod y Annapure (2016) con modificaciones. Se pesó un gramo de muestra, la cual se incubó (15 mg pepsina en 20 mL de HCl 0.1 N neutralizada con 10 mL NaOH 0.2 N) a 37 °C / 3 h. Se agregaron 7.5 mL de solución reguladora de fosfatos (pH=8) que contenían 40 mg de pancreatina, se incubó a 37 °C por 24 h, luego se agregaron 700 µL de ácido TCA (tricloroacético) y se centrifugó a 5,000xg/10 min. Se descartó el sobrenadante y el precipitado se secó (40-50 °C) y posteriormente se utilizó en la digestión de proteínas en sistema MicroKjehldal. La digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) (%) se calculó como:

$$DPIV (\%) = [(Proteína\ total - Residuo\ de\ Proteína)/(Proteína\ total)] \times 100$$

### **c. Perfil de aminoácidos**

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

### **d. Perfil de minerales**

El perfil de minerales se realizó con el uso de espectrofotometría de absorción atómica (Agilent Technologies, modelo 240FS AA, modalidad flama), siguiendo el método descrito por la AOAC (2012). El método se fundamenta en que los átomos libres en estado fundamental pueden absorber la luz a una cierta longitud de onda, específica para cada elemento. Se determinaron los minerales: calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, manganeso, cobre y zinc realizando la determinación a una longitud de onda 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 emplearon lámparas de cátodo hueco excepto en la medición de sodio y potasio, los cuales fueron determinados por emisión y no por absorbancia. Las determinaciones se llevaron a cabo utilizando flama aire-acetileno con excepción del Ca y Mg en las que se usó flama de óxido nitroso-acetileno. El tipo de medida del instrumento empleado fue de absorbancia, excepto para el caso de K y Na que se determinaron por emisión. El acondicionamiento de las muestras, se desarrolló pesando aproximadamente 1 g de muestra seca en crisoles

de porcelana. Posteriormente, las muestras se calcinaron a 550 °C/8 h en una mufla (marca Thermo scientific, modelo F30430CM-33) y se dejaron hasta alcanzar temperatura ambiente. Se agregaron 5 mL de ácido clorhídrico concentrado a cada crisol y fueron filtrados con papel filtro Whatman No. 1, recolectando el líquido en matraces volumétricos de 100 mL. Finalmente se aforaron con agua destilada y se procedió a la determinación de minerales. Todas las determinaciones se efectuaron por triplicado. La elaboración de las curvas de calibración para cada elemento se llevó a cabo de manera automática, utilizando un sistema automatizado de introducción y dilución de muestras (SIPS) mediante la ayuda de un sistema de bombeo de agua y muestra (SIPS) acoplado al equipo. Para su elaboración se prepararon soluciones concentradas conocidas para cada elemento (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. Estudio *in vivo* del índice glicémico**

El estudio *in vivo* del índice glicémico se determinó siguiendo la metodología propuesta por Goñi y Valentin-Gamazo (2003), con ligeros cambios descritos por Granito y col (2014). Participaron doce voluntarios en estado óptimo de salud de 20 ± 2 años, que no padecían diabetes mellitus ni ninguna enfermedad crónica (**Cuadro 7**). Se utilizaron como criterios de inclusión las variables antropométricas necesarias calcular en índice de masa corporal (peso y talla). Se aplicó una serie de preguntas para asegurar que las personas no estuvieran ingiriendo ningún medicamento o suplemento alimenticio y tampoco estuvieran en estado de embarazo. El comité de ética del laboratorio de análisis clínicos de la Universidad Autónoma de Sinaloa,

México, aprobó el protocolo del estudio y los participantes proporcionaron de manera escrita su consentimiento informado.

Cada participante ingirió los alimentos de prueba (pan blanco, pasta control (PC) y pasta óptima (OP)) cumpliendo con un ayuno nocturno. Las personas participaron en el análisis por un periodo de tres días no consecutivos. El primer día del análisis, los voluntarios ingirieron pan blanco (50 g). El día dos, consumieron pasta control cocida (50 g), finalmente el tercer día consumieron pasta óptima cocida (50 g). Los alimentos se ingirieron en un lapso de 10 a 12 minutos y se bebieron 250 mL de agua con los alimentos.

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

La cuantificación de glucosa se realizó mediante un espectrofotómetro digital semiautomático (marca Mindray, modelo BA-88), con los reactivos Glucose-LQ Spinreact Lote: LIQ539, fecha de vencimiento 04-2024, siguiendo los estándares de control de calidad establecidos en el programa interno.

El índice glucémico se realizó utilizando la metodología descrita por 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): La CG representa una medida derivada del valor de IG del alimento en estudio y se calculó según la siguiente fórmula:

$$GL = (GI * CHO)/100$$

Dónde:

**IG**= índice glucémico del alimento a evaluar.

**CHO**= carbohidratos presentes en el alimento por ración.

Los valores resultantes se categorizaron en CG alto >20, CG medio 11-19 y CG bajo <10.

## **11 Detección de gliadinas**

La determinación del contenido de gliadinas en las muestras se realizó utilizando un kit comercial AgraStrip® Gluten G12. Primero se pesó 0.2 g de muestra, la cual se puso en un tubo de extracción, posteriormente el tubo se llenó con la solución de extracción llegando al nivel indicado. Después, durante 1 minuto se agitó en vortex y seguido a esto se pasaron 3 gotas del extracto a un tubo etiquetado como tubo de dilución completándose con el buffer de dilución siguiendo el nivel de corte que se deseaba, indicado por las marcas 5, 10 y 20 ppm. Se cerró el tubo correctamente y por 15 segundos fue agitado utilizando un vortex, se quitó la tapa y se colocó en el interior una tira en forma vertical permitiendo que el líquido llegara al nivel indicado y se dejó en reposo por 45 segundos. Se apartó la tira del tubo de dilución y se puso en forma vertical en una gradilla, se ubicó en reposo por 10 minutos para permitir que se llevara a cabo el análisis, pasados los 10 minutos se leyeron los resultados al instante.

## **12. Análisis sensorial**

La aceptabilidad general se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita por Lim (2011). Las pastas alimenticias evaluadas fueron aquellas que se obtuvieron a partir de la formulación óptima (PO) y una pasta alimenticia control (PC), empleando 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. Se seleccionaron 120 panelistas no entrenados (60 hombres y 60 mujeres) para realizar el análisis, siendo el principal criterio de inclusión el gusto por consumir cualquier tipo de pasta, además de ser mayores de 17 años. De los participantes seleccionados, 60 panelistas (30 hombres y 30 mujeres) se les dio una breve descripción de los beneficios nutricionales que aportaban las pastas, pidiéndoles que leyeran dicha información por tres veces, y, posteriormente observaran, olieran y probaran el producto. Para finalizar, los panelistas llenaron un cuestionario en donde dieron a conocer cuál era el nivel de aceptabilidad general, además de los atributos (color, textura y sabor) de cada muestra. Los 60 panelistas que faltaban, llevaron a cabo el mismo procedimiento que se describió anteriormente, pero ellos sin recibir ningún tipo de información sobre el contenido nutricional de las pastas.

Asimismo, utilizando la escala propuesta por Whitlark y col (1993) con ligeras modificaciones, se analizó 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 MATERIAS PRIMAS

#### 1. Composición proximal

La composición proximal del arroz quebrado y harina de nopal se muestra en el **Cuadro 7**. Los valores presentados en el arroz quebrado fueron similares a los reportados por Ahmed y col (2016). Mientras que los resultados encontrados en la harina de nopal son cercanos a los reportados por Diego-Zarate y col (2021). De acuerdo con la composición proximal de la harina de nopal, se puede observar que presentó un alto contenido de fibra, por lo cual podría ser utilizada para elaborar pastas alimenticias con características funcionales. Además, la harina de nopal presentó un alto contenido de cenizas, siendo un indicador de elevados niveles de minerales, lo cual es una excelente característica para ser utilizada en la elaboración de pastas alimenticias, con mejores características nutricionales.

#### 2. Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) de las materias primas

Se realizaron pruebas de índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) en las materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas, encontrando un valor de IAA para la harina de arroz quebrado de  $2.10 \pm 0.03$  g de agua absorbida/g sólidos secos (g.a.a./g.s.s.) y de ISA de  $0.53 \pm 0.02\%$ . Para el caso de la harina de nopal, se encontró un valor de IAA de  $5.77 \pm 0.42$  g.a.a./g.s.s., y de ISA de  $30.66 \pm 0.68\%$ . Becker y col (2014) obtuvieron valores similares de ISA en harina de arroz, reportando un valor de 1.22%. Asimismo, Du-Toit y col (2019) reportaron un valor similar de IAA en harina de nopal, reportando 5.29 g.a.a./g.s.s.

**Cuadro 7.** Composición química (b.s.) de las materias primas utilizadas para la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten a partir de arroz quebrado y nopal.

<b>Compuestos (%)</b>	<b>Harina de arroz quebrado</b>	<b>Harina de nopal</b>
<b>Peso seco</b>	90.85 ± 0.02	93.94 ± 0.05
<b>Cenizas</b>	0.61 ± 0.01	23.61 ± 0.02
<b>Extracto etéreo</b>	0.44 ± 0.02	1.65 ± 0.04
<b>Proteínas</b>	7.20 ± 0.01	11.74 ± 1.05
<b>Fibra cruda</b>	2.37 ± 0.17	18.23 ± 0.32
<b>Carbohidratos*</b>	89.38 ± 0.23	44.77 ± 0.04

Media ± Desviación estándar

\*Calculado por diferencia de 100

## **B. ESTUDIO PRELIMINAR DE EXTRUSIÓN**

Se realizó un estudio preliminar de extrusión con el objetivo de fijar las diferentes condiciones de procesamiento, concentraciones de materias primas a utilizar en las mezclas, y los factores de estudio y sus niveles de variación. Se fijaron las condiciones de humedad a 28%, temperaturas de alimentación de  $75 \pm 1$  °C, y temperatura de salida del dado de  $80 \pm 1$  °C, en base a este estudio preliminar, revisión bibliográfica de pastas alimenticias elaboradas por extrusión, y a un trabajo previo a la presente investigación realizado por Pérez-Murillo (2015), quien elaboró mediante el proceso de extrusión pastas alimenticias elaboradas con sémola de trigo, maíz amarillo y cáscara de calabaza Cehualca. Asimismo, a partir de los resultados del estudio preliminar, se determinó utilizar como base harina de arroz quebrado con el fin de darle valor agregado a este subproducto de la molienda de arroz.

Posteriormente, se realizaron pruebas para fijar los niveles de los factores de estudio, que fueron temperatura de extrusión (TE), contenido de humedad (H) y contenido de harina de nopal (CN). De dicho estudio, se concluyó que un rango de temperaturas de 85 a 126 °C era el adecuado, ya que al aumentar la temperatura por encima de 126 °C en las pastas se incrementaba su expansión al salir del extrusor, siendo esta característica no requerida en pastas alimenticias. Asimismo, cuando se empleaban temperaturas menores a 85 °C, las pastas obtenidas no presentaban buena apariencia. Para el caso del H, se fijaron niveles entre 21 y 35%, ya que se pudo observar que cuando se utilizaron humedades por encima de 35% las pastas no lograban la expansión requerida y tenían una estructura muy quebradiza; en el caso de las pastas que se obtenían a H por debajo de 21% estas no fluían adecuadamente y provocaban problemas en el funcionamiento del equipo. Para el caso del CN, se

decidió fijar un porcentaje máximo en las mezclas de 22%, ya que se observó que, al adicionar mayor concentración de harina de nopal, las pastas no presentaban una buena integridad, propiedades de cocción no favorables y un color muy oscuro.

### **C. ESTUDIO DE EXTRUSIÓN**

Una vez establecidas las concentraciones de las materias primas a emplear 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 8** muestra el análisis de varianza para índice de absorción de agua (IAA) índice de solubilidad en agua (ISA) y parámetro de color ( $\Delta E$ ).

##### **a. Índice de solubilidad en agua (ISA)**

Para el análisis de la variable índice de solubilidad en agua (ISA), se utilizó un modelo cuadrático el cual fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.97$ ,  $CV = 4.99\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.054$ ) (**Cuadro 8**). 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,  $b_1$ ,  $p = 0.74$ ), mientras que los factores H ( $b_2$ ,  $p < 0.001$ ) y CN ( $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) sí presentaron efecto significativo. Asimismo, solamente los factores TE ( $b_{11}$ ,  $p < 0.001$ ) y CN ( $b_{33}$ ,  $p < 0.001$ ) presentaron efecto significativo en su término cuadrático. En el análisis de las interacciones, se obtuvo que las interacciones que presentaron efecto significativo (**Cuadro 9**) fueron TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p < 0.001$ ) y H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p < 0.001$ ). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

**Cuadro 8.** Análisis de varianza de las respuestas físicas y fisicoquímicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de nopal.

<b>Respuesta</b>	<b>R<sup>2</sup> (ajustada)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Valor F</b>	<b>p de F (Modelo)</b>	<b>Falta de ajuste</b>
<b>ISA</b>	0.97	4.99	76.40	<0.001	0.054
<b>IAA</b>	0.99	1.06	424.39	<0.001	0.09
<b>ΔE</b>	0.88	5.89	19.66	<0.001	0.07

CV= Coeficiente de variación; IAA= Índice de absorción de agua; ISA= Índice de solubilidad en agua; ΔE= Diferencia total de color entre pasta sin procesar y la pasta procesada por extrusión.

**Cuadro 9.** Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia para las respuestas fisicoquímicas y de color evaluadas en las pastas alimenticias obtenidas.

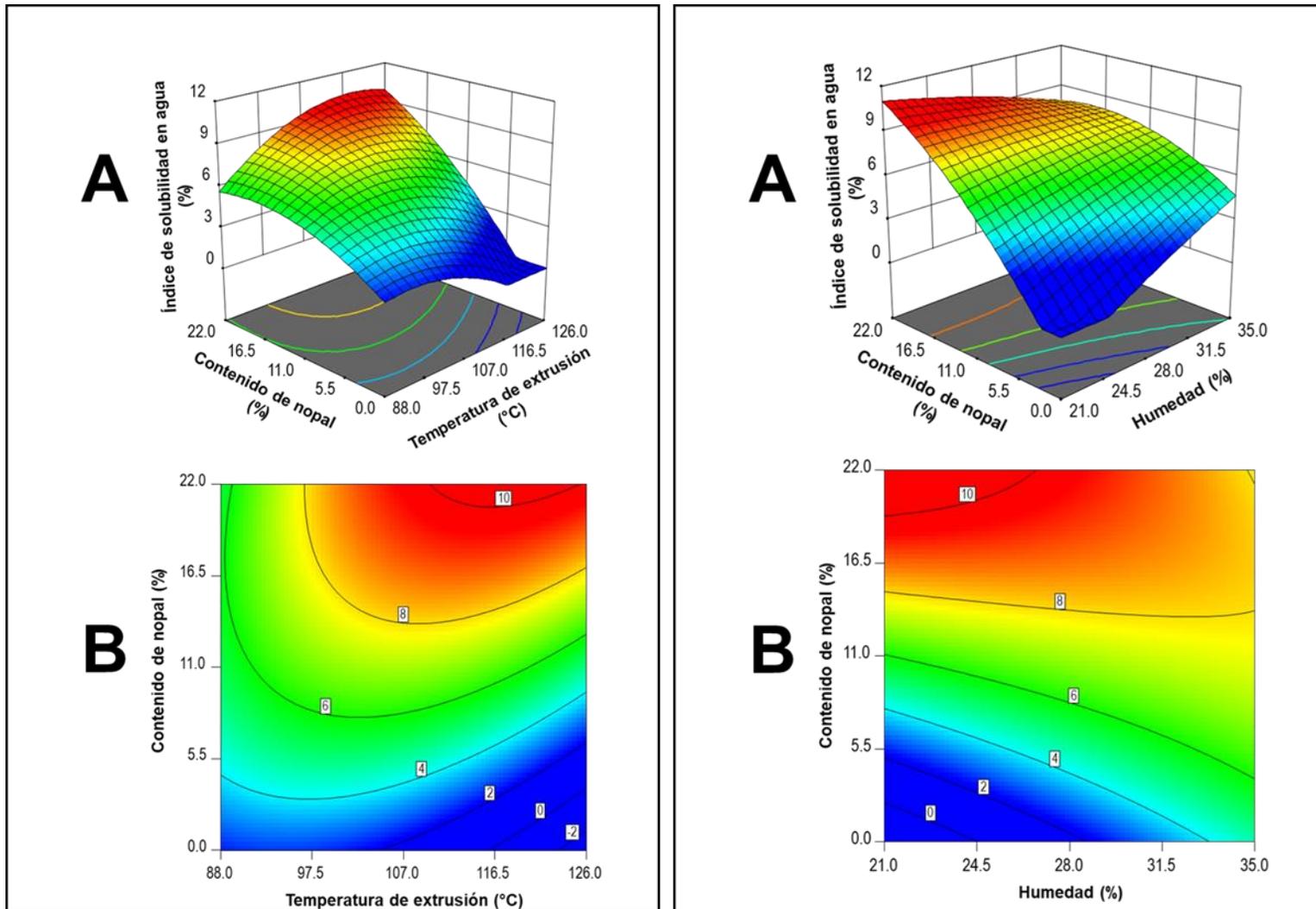
	<b>ISA</b>	<b>IAA</b>	<b><math>\Delta E</math></b>
<b>Intercepto</b>	<b>7.45</b>	<b>4.39</b>	<b>40.17</b>
<b>Lineal</b>			
TE (b <sub>1</sub> )	-0.03 (0.74)	0.03 (0.01)	-0.27 (0.65)
H (b <sub>2</sub> )	0.37 (<0.001)	0.68 (<0.001)	-6.40 (<0.001)
CN (b <sub>3</sub> )	2.06 (<0.001)	-0.21 (<0.001)	-2.19 (<0.001)
<b>Cuadrático</b>			
TE (b <sub>11</sub> )	-0.65 (<0.001)	-0.03 (0.02)	0.35 (0.56)
H (b <sub>22</sub> )	-0.09 (0.32)	0.22 (<0.001)	-3.01 (<0.001)
CN (b <sub>33</sub> )	-0.41 (<0.001)	-0.003 (0.81)	0.28 (0.64)
<b>Interacciones</b>			
TE*H (b <sub>12</sub> )	-0.05 (0.64)	0.19 (<0.001)	0.70 (0.39)
TE*CN (b <sub>13</sub> )	0.76 (<0.001)	-0.20 (<0.001)	-0.21 (0.79)
H*CN (b <sub>23</sub> )	-0.74 (<0.001)	-0.19 (<0.001)	-0.61 (0.46)

IAA= Índice de absorción de agua; ISA= Índice de solubilidad en agua;  $\Delta E$ = Diferencia total de color entre pasta sin procesar y la pasta procesada por extrusión; FF= Fuerza de flexión; TE= Temperatura de extrusión; H= Humedad; CN= Contenido de harina de nopal

$$\text{ISA} = 7.45 - 0.02 \cdot \text{TE} + 0.37 \cdot \text{H} + 2.05 \cdot \text{CN} - 0.05 \cdot \text{TE} \cdot \text{H} + 0.76 \cdot \text{TE} \cdot \text{CN} - 0.74 \cdot \text{H} \cdot \text{CN} - 0.65 \cdot \text{TE}^2 - 0.09 \cdot \text{H}^2 - 0.41 \cdot \text{CN}^2$$

El índice de solubilidad en agua determina la cantidad de polisacáridos libres o polisacáridos liberados del gránulo por adición de exceso de agua. Además, el ISA refleja la degradación macromolecular del almidón, un alto ISA indica la presencia de moléculas de almidón dextrinizado (Oikonomou y Krokida, 2011).

En la **Figura 5** se muestra el efecto de la TE y el CN sobre el ISA de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. Se puede observar que los menores valores se obtuvieron a alta TE (>107 °C) y bajo CN (<5.5%). Por otro lado, en la **Figura 5** se muestra el efecto del contenido de H y CN sobre el ISA a una TE constante de 107 °C, mostrando que los menores valores de ISA (2.5%), se obtuvieron a bajo contenido de H y bajo CN. Esto podría deberse a los altos valores de ISA que presentó la harina de nopal (30.66 ± 0.68%), debido a su naturaleza, ya que presenta varios componentes solubles en agua, como son las gomas y mucílagos, además de otros compuestos, por lo que al incrementarse su concentración en las mezclas extrudidas los valores de ISA se incrementaron. En las pastas alimenticias se buscan valores bajos de ISA, pues el ISA refleja la capacidad de hinchamiento de la pasta después de la cocción, por lo tanto, altos niveles de solubilidad en agua pueden destruir la integridad estructural del producto. Los valores de ISA obtenidos en el presente estudio son similares a los reportados por Ramírez-Chicas y col (2015), quienes obtuvieron valores de ISA de 5.56 a 12.59 % en pastas adicionadas con almidón de yuca, quienes atribuyeron el incremento de la solubilidad a la dispersión de las moléculas de amilosa y amilopectina, como resultado de la gelatinización.



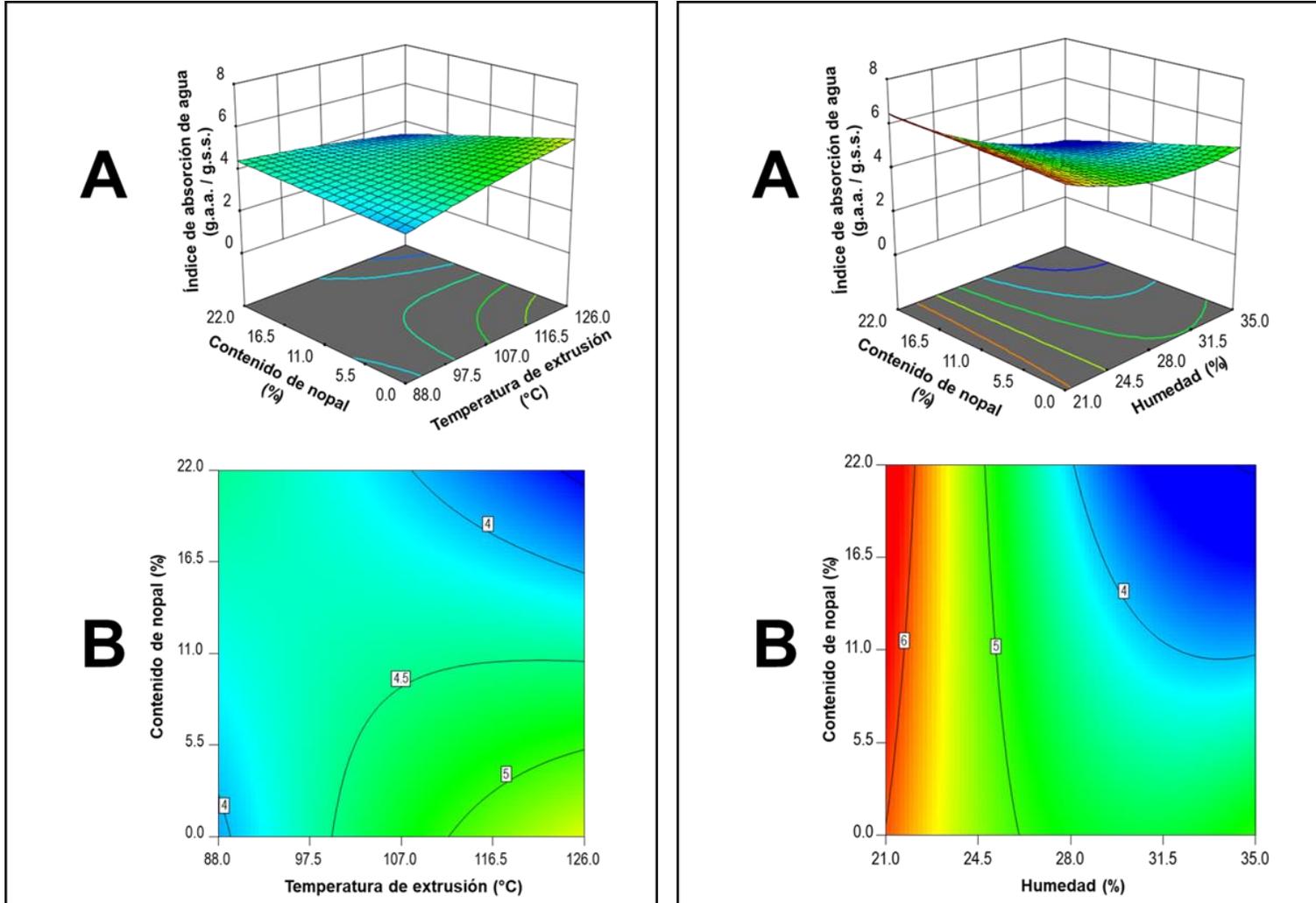
**Figura 5.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre el índice de solubilidad en agua (ISA) de pastas alimenticias libres de gluten. A, superficies y B, contornos.

#### **d. 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 que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.99$ ,  $CV = 1.06\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.09$ ) (**Cuadro 8**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) no tuvo efecto significativo en su término lineal ( $b_1$ ,  $p = 0.01$ ) ni en su término cuadrático ( $b_2$ ,  $p = 0.02$ ). Por otro lado, el factor contenido de humedad (H) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_2$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p < 0.001$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este mostró efecto significativo en su término lineal ( $b_3$ ,  $p < 0.001$ ), pero no en su término cuadrático ( $b_{33}$ ,  $p = 0.81$ ). En el análisis de las interacciones, se encontró que las interacciones TE\* H ( $b_{12}$ ,  $p < 0.001$ ), TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p < 0.001$ ), y H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p = 0.02$ ) presentaron efecto significativo (**Cuadro 9**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{IAA} = 4.39 + 0.03 \cdot \text{TE} - 0.68 \cdot \text{H} - 0.21 \cdot \text{CN} + 0.19 \cdot \text{TE} \cdot \text{H} - 0.20 \cdot \text{TE} \cdot \text{CN} - 0.19 \cdot \text{H} \cdot \text{CN} - 0.034 \cdot \text{TE}^2 + 0.22 \cdot \text{H}^2 - 0.003 \cdot \text{CN}^2$$

En la **Figura 6** se muestra el efecto de la TE y CN sobre el IAA de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. Se puede observar que los mayores valores (6.5 g.a./g.s.s) de IAA se obtuvieron a altas TE ( $> 107^\circ\text{C}$ ) y altos CN ( $> 11\%$ ). Esto se puede atribuir a que a altas TE se ocasiona una mayor modificación en la estructura del almidón, lo cual trae como resultado un incremento en la retención de agua. Asimismo, al incrementar la TE se pudo haber presentado una modificación severa de los componentes de las materias primas, principalmente la harina de nopal por ser rica en algunas gomas y pectinas, liberando estas gomas,



**Figura 6.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre el índice de absorción en agua (IAA) de pastas alimenticias libres de gluten. **A**, superficies y **B**, contornos.

y permitiendo retener una mayor cantidad de agua. Por otro lado, en la **Figura 6** se muestra el efecto del contenido de H y CN sobre el IAA, a una TE constante de 107 °C. Se obtuvieron los mayores valores de IAA a bajos contenidos de H en todo el rango de CN estudiado. Esto pudo deberse a que en bajas humedades hay una mayor fricción dentro del extrusor, ocasionado a un mayor tiempo de residencia, provocando una alta modificación en la estructura de los componentes, permitiendo la retención de una mayor cantidad de agua. Se ha reportado (reportar referencia) que el IAA puede variar con el grado de gelatinización del almidón durante el proceso de extrusión. Por otra parte, Delgado-Nieblas y col (2012) reportaron que la presencia de compuestos como gomas en productos extrudidos, incrementan la absorción de agua de dichos productos. Valores similares a los obtenidos en esta investigación fueron reportados por Pérez-Murillo y col (2015), quienes obtuvieron valores de IAA de 3 a 6 g.a.a./g.s.s, en pastas alimenticias obtenidas a partir de sémola de trigo, maíz amarillo y cáscara de calabaza.

#### **h. Parámetro de color ( $\Delta E$ ):**

Para el análisis de la variable de respuesta parámetro de color ( $\Delta E$ ), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.88$ ,  $CV = 5.89\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.07$ ) (**Cuadro 8**). 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 ( $b_1$ ,  $p = 0.65$ ) ni en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p = 0.56$ ). Asimismo, el factor contenido de humedad (H) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_2$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p < 0.001$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este tuvo efecto significativo en su término lineal

( $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) pero no en su término cuadrático ( $b_{33}$ ,  $p = 0.64$ ). En el análisis de interacciones, se obtuvo que las interacciones TE\*H ( $b_{12}$ ,  $p = 0.39$ ), TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p = 0.79$ ) y H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p = 0.46$ ) no tuvieron efecto significativo.

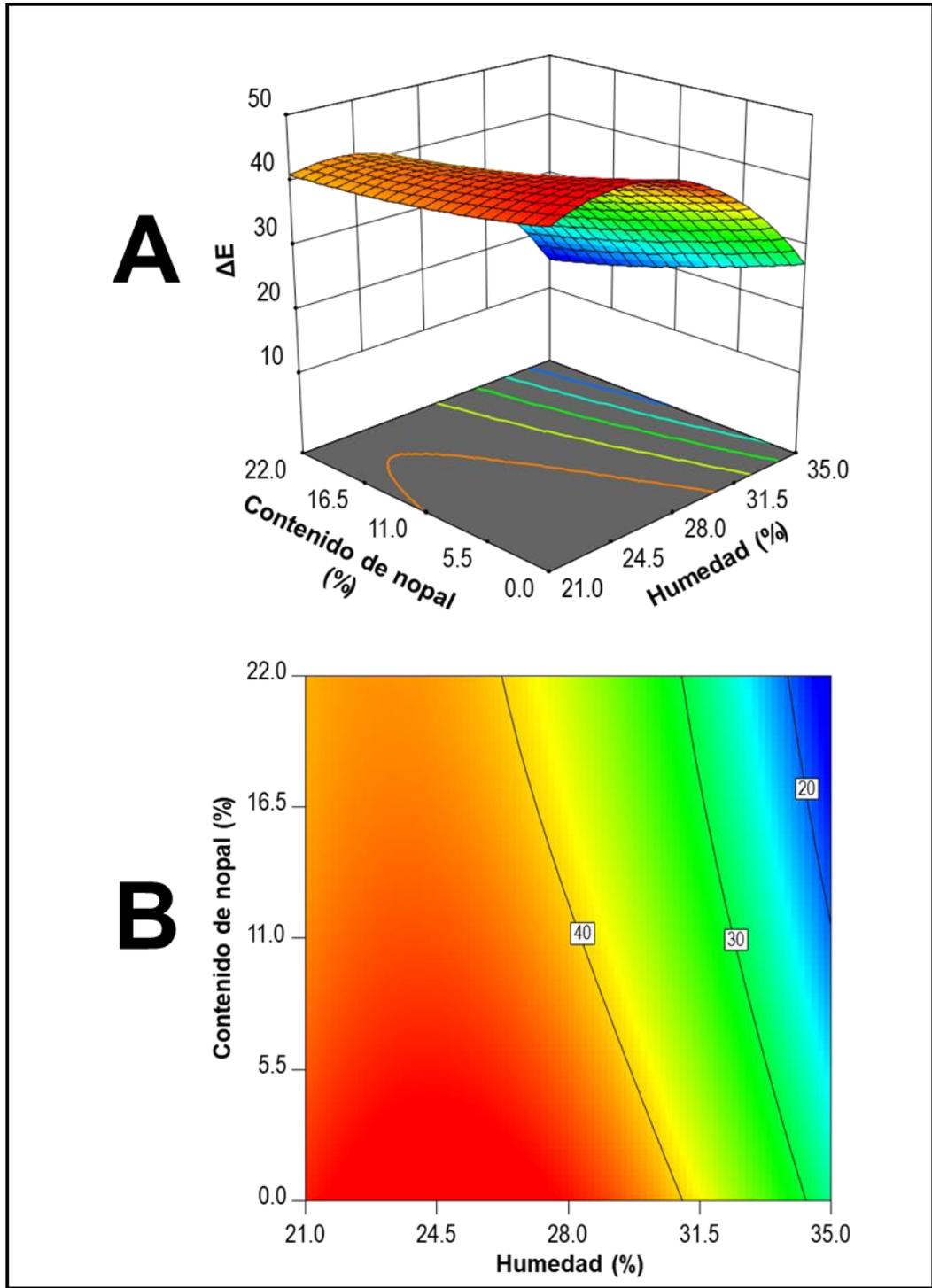
$$\Delta E = 40.17 - 0.27*TE - 6.39*H - 2.19*CN + 0.70*TE*H - 0.21*TE*CN - 0.61*H*CN + 0.35*TE^2 - 3.01*H^2 + 0.28*CN^2$$

En la **Figura 7** se muestra el efecto de contenido de H y CN sobre los valores experimentales de  $\Delta E$ . Se presentaron los valores mayores a bajo contenido de H (<24.5%) y a bajos CN (<5.5%). Esto pudo deberse a que a bajos contenidos de humedad se dio un incremento en la severidad del proceso, debido a una mayor fricción en el extrusor, fluyendo menos rápido el material, y aumentando su tiempo

## 2. Análisis de propiedades de cocción

La sustitución parcial o completa del componente principal de la pasta, es decir, la “sémola”, por lo regular genera propiedades de cocción más bajas en comparación a la pasta tradicional (Mastromatteo y col 2012). La principal finalidad de adicionar ingredientes no convencionales a la pasta es incrementar el valor nutricional. Sin embargo, esto podría afectar algunas de las características de cocción. Para que una pasta sea considerada de buena calidad debe presentar buena resistencia a la cocción, mínimas pérdidas de cocción, alto aumento de peso, y aceptables características de textura y sensoriales (Nasehi y col 2009).

En el **Cuadro 10** se muestra el análisis de varianza de las propiedades de cocción de las pastas, las cuales son, tiempo de cocción (TC), aumento de peso (AP), aumento de volumen (AV), y pérdida de sólidos por cocción (PSC). Los parámetros evaluados en pastas mostraron valores de  $R^2_{ajustada} \geq 0.91$ , presentando coeficientes de variación (CV) entre 0.72 y 7.31, los modelos fueron significativos



**Figura 7.** Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). **A**, superficies y **B**, contornos.

**Cuadro 10.** 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 nopal.

<b>Respuesta</b>	<b>R<sup>2</sup> (ajustada)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Valor F</b>	<b>p de F (Modelo)</b>	<b>Falta de Ajuste</b>
<b>TC</b>	0.91	6.68	23.66	<0.001	0.09
<b>AP</b>	0.97	0.72	56.07	<0.001	0.62
<b>AV</b>	0.97	0.72	87.15	<0.001	0.058
<b>PSC</b>	0.94	7.31	36.97	<0.001	0.06

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

( $p < 0.001$ ), y ninguno presentó falta de ajuste ( $p > 0.05$ ) (**Cuadro 13**).

#### a. Tiempo de cocción (TC)

Uno de los parámetros que más contribuye a la alta demanda de las pastas alimenticias por parte de los consumidores, es su pronta cocción. El tiempo de cocción de una pasta es el tiempo necesario para obtener una gelatinización completa del almidón (Sissons y col 2022).

Para el análisis de la variable de respuesta tiempo de cocción (TC), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.91$ ,  $CV = 6.68\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.09$ ) (**Cuadro 10**).

A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) únicamente presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_1$ ,  $p = 0.021$ ). Asimismo, el factor contenido de humedad (H) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_2$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p < 0.001$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este tuvo efecto significativo en su término lineal ( $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{33}$ ,  $p = 0.018$ ). En el análisis de interacciones, se obtuvo que la interacción H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p = 0.005$ ) presentó efecto significativo (**Cuadro 11**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

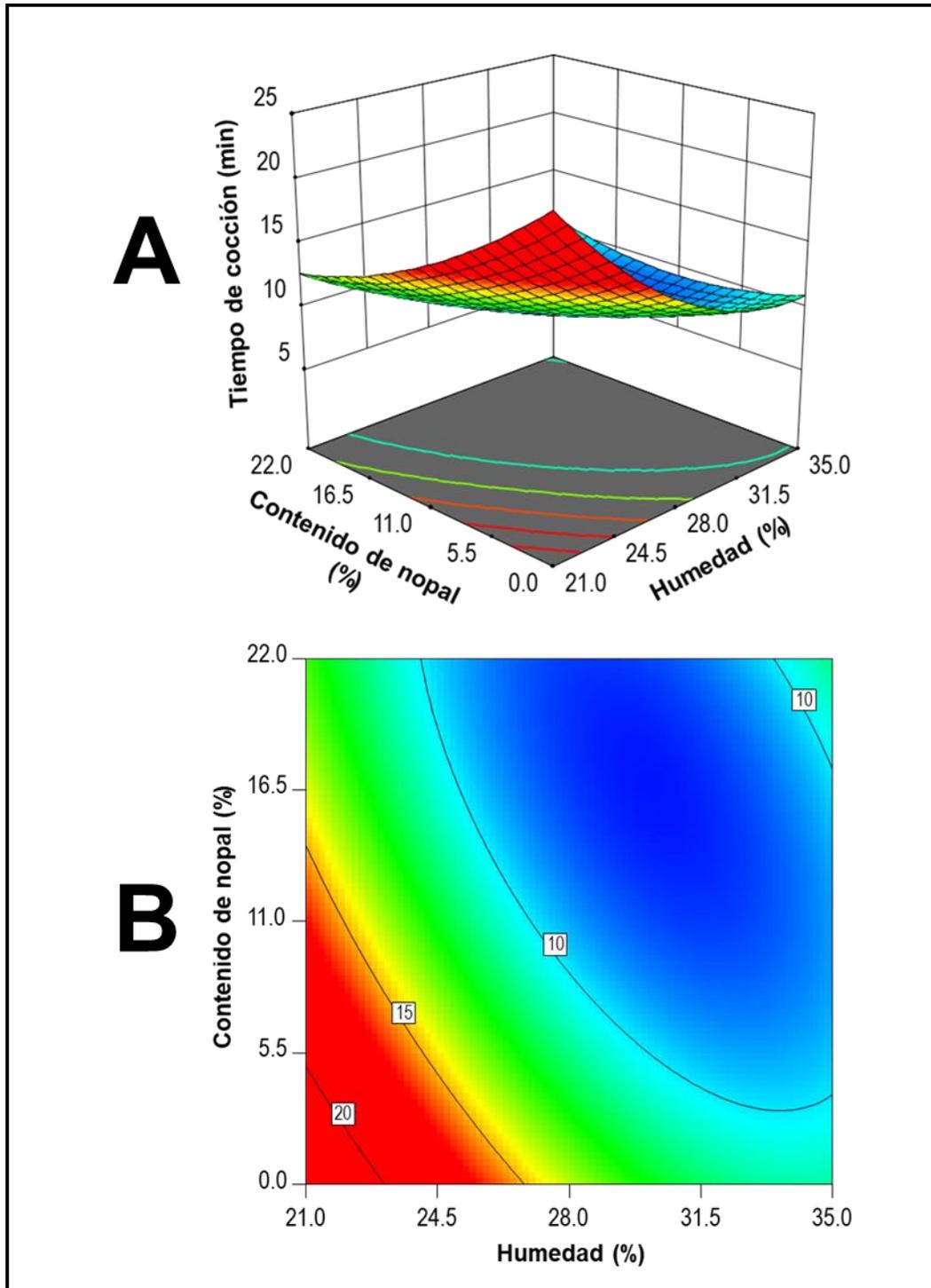
$$\text{TC} = 9.18 - 0.51 \cdot \text{TE} - 1.88 \cdot \text{H} - 1.28 \cdot \text{CN} + 0.62 \cdot \text{TE} \cdot \text{H} + 0.12 \cdot \text{TE} \cdot \text{CN} + 0.87 \cdot \text{H} \cdot \text{CN} \\ + 0.25 \cdot \text{TE}^2 + 1.13 \cdot \text{H}^2 + 0.51 \cdot \text{CN}^2$$

En la **Figura 8** se muestra el efecto de la interacción H y CN sobre los valores de TC. Se observa que se obtuvieron los menores valores (8 min) a altos contenidos de H (>28%) y altos CN (>15.0%). Este comportamiento se puede atribuir a que, conforme se incrementó el CH y CN, se presentó una disminución en el índice de

**Cuadro 11.** 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
<b>Intercepto</b>	9.19	214.74	59.05	6.24
<b>Lineal</b>				
TE (b <sub>1</sub> )	-0.51 (0.021)	2.46 (0.01)	0.68 (<0.001)	-0.31 (0.18)
H (b <sub>2</sub> )	-1.89 (<0.001)	-2.54 (0.009)	-1.50 (<0.001)	2.26 (<0.001)
CN (b <sub>3</sub> )	-1.29 (<0.001)	-2.88 (0.005)	1.18 (<0.001)	2.49 (<0.001)
<b>Cuadrático</b>				
TE (b <sub>11</sub> )	0.25 (0.201)	4.84 (<0.001)	0.82 (<0.001)	-0.92 (<0.001)
H (b <sub>22</sub> )	1.14 (<0.001)	6.43 (<0.001)	1.45 (<0.001)	1.83 (<0.001)
CN (b <sub>33</sub> )	0.51 (0.018)	-2.93 (0.004)	-1.42 (<0.001)	0.63 (0.01)
<b>Interacciones</b>				
TE*H (b <sub>12</sub> )	0.62 (0.03)	6.44 (<0.001)	1.52 (<0.001)	-0.07 (0.81)
TE*CN (b <sub>13</sub> )	0.12 (0.624)	1.22 (0.075)	-0.61 (<0.001)	1.02 (<0.001)
H*CN (b <sub>23</sub> )	0.87 (0.005)	-1.35 (0.055)	-0.28 (0.09)	1.13 (<0.001)

TC= Tiempo de cocción; AP= Aumento de peso; AV= Aumento de volumen; PSC= Pérdida de sólidos por cocción; TE= Temperatura de extrusión; H= Contenido de Humedad; CN= Contenido de harina de nopal



**Figura 8.** Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre el tiempo de cocción (TC) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). **A**, superficies y **B**, contornos.

expansión (IE) de las pastas. Una disminución en el IE incrementa la difusión del agua a través de la matriz de la pasta, reduciendo el tiempo que el agua necesita para llegar al centro de la pasta durante el proceso de cocción (Granito y col 2014). El TC influye sobre la textura y el sabor de las pastas, si las pastas no quedan bien cocidas, su textura es dura y su sabor es característico al de la harina cruda que se utilizó como materia prima. Mientras que, si el tiempo de cocción es mayor al requerido, las pastas se desintegran, presentando una textura muy blanda y pegajosa y cambio en su color, aspectos considerados desagradables por los consumidores (Samaan y col 2006).

Por su parte, un alto contenido de H pudo haber causado una gelatinización más eficiente, debido a una mayor interacción del agua con las cadenas de amilosa y amilopectina.

La amilosa y/o la amilopectina en la pasta de arroz juegan un papel clave en la creación de una red de almidón, lo que explica la integridad de la textura de la pasta después de la cocción (Marti y col 2010). La cocción del almidón de arroz conduce a la gelatinización que ocurre al mismo tiempo que la desnaturalización de la proteína (Cabrera-Chávez y col 2012). Bastos y col (2016) elaboraron una pasta libre de gluten a base de harina de amaranto adicionadas con harina de papa extrudida, en donde reportaron que la pasta libre de gluten requería menos tiempo de cocción en comparación con pasta de trigo tradicional.

Manthey y col (2004) evaluaron diferentes niveles de hidratación de las materias primas (29, 30, 31 y 32%) sobre la calidad de cocción de pastas elaboradas con sémola y trigo sarraceno (30%), obteniendo tiempos de cocción de 9.3 a 10.8 min. Asimismo, diversos autores han evaluado el tiempo de cocción en pastas libres de gluten

reportando valores de  $13.8 \pm 0.1$  min (Criollo-Feijoo y col 2017) y 8.5 min (Sereewat y col 2015), los cuales son similares a los obtenidos en el presente estudio.

### **b. Aumento de peso (AP)**

El porcentaje de aumento de peso en las pastas alimenticias está relacionado con la capacidad de absorción de agua que posee el almidón. Durante la cocción, los gránulos de almidón se hinchan y absorben agua, lo que implica un aumento en su peso. El comportamiento de las pastas durante y después de la cocción es el parámetro de calidad de mayor importancia para los consumidores, encontrándose dentro de ellos el aumento de peso, junto con el tiempo de cocción. Para que una pasta sea catalogada como de buena calidad debe de presentar un aumento de peso por encima de 200% (Pagnussatt y col 2014).

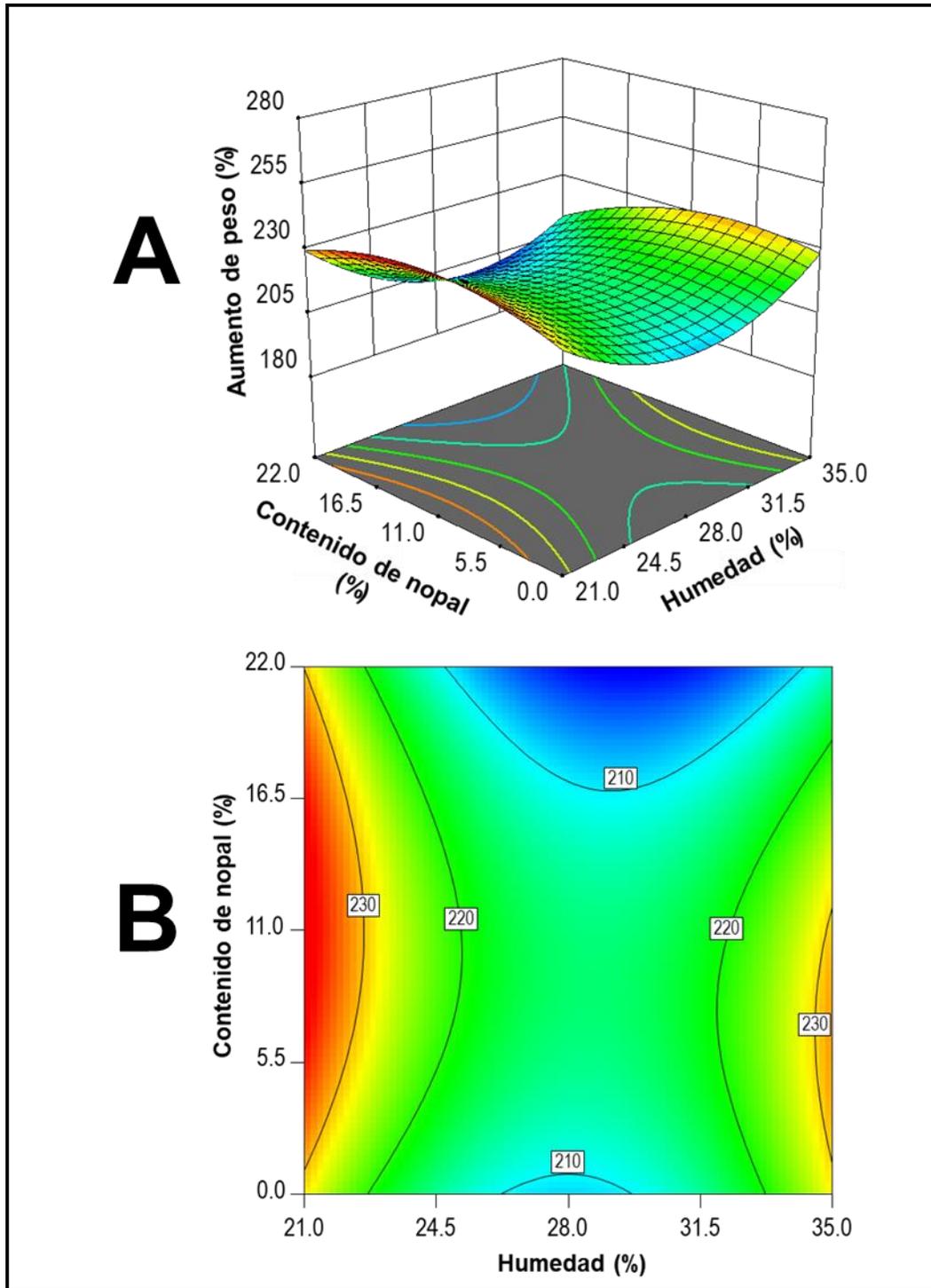
Para el análisis de la variable de respuesta aumento de peso (AP), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.97$ ,  $CV = 0.72\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.62$ ) (**Cuadro 10**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que la temperatura de extrusión (TE) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_1$ ,  $p = 0.01$ ) y en su término cuadrático ( $b_{11}$ ,  $p < 0.001$ ). Igualmente, el factor contenido de humedad (H) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_2$ ,  $p = 0.009$ ) y en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p < 0.001$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este también tuvo efecto significativo en su término lineal ( $b_3$ ,  $p = 0.005$ ) y en su término cuadrático ( $b_{33}$ ,  $p = 0.004$ ). En el análisis de interacciones, solamente la interacción H\*CN ( $b_{12}$ ,  $p < 0.001$ ) presentó efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$AP = 214.73 + 2.46*TE - 2.53*H - 2.87*CN + 6.44*TE*H + 1.21*TE*CN - 1.34*H*CN + 4.84*TE^2 + 6.43*H^2 - 2.92*CN^2$$

En la **Figura 9** en donde se puede observar que los mayores valores de AP se obtuvieron a bajos contenidos de H (<24.5%) y en todo el rango de CN. Este comportamiento pudiera deberse a que en condiciones de H bajas se pudo haber presentado una importante modificación de los componentes estructurales de las pastas, principalmente los gránulos de almidón, debido a una menor fluidez, y un aumento en la fricción en el interior del extrusor (Hernández-Medina y col 2008). Lo anterior, pudo haber provocado un aumento en la absorción de agua en las pastas, favoreciendo un aumento en su peso y en su volumen. La absorción de agua de la pasta depende de la debilidad de los gránulos de almidón y está relacionado con la cantidad de almidón dañado. Lucisano y col (2012), evaluaron el porcentaje de aumento de peso en espaguetis comerciales libres de gluten, su AP varió entre 100 y 162%. Por otro lado, Faheid y col (2022) obtuvieron valores de 159-190% de AP en una pasta libre de gluten a partir de harina de arroz, harina de maíz blanco, almidón de papa, aislado de proteína de soya y cáscara de *psyllium*.

### c. Aumento de volumen (AV)

Para el análisis de la variable de respuesta aumento de volumen (AV), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.97$ ,  $CV = 0.72\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.058$ ) (**Cuadro 10**). 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 ( $b_1$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{11}$ ,  $p < 0.001$ ).



**Figura 9.** Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre el aumento de peso (AP) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). **A**, superficies y **B**, contornos.

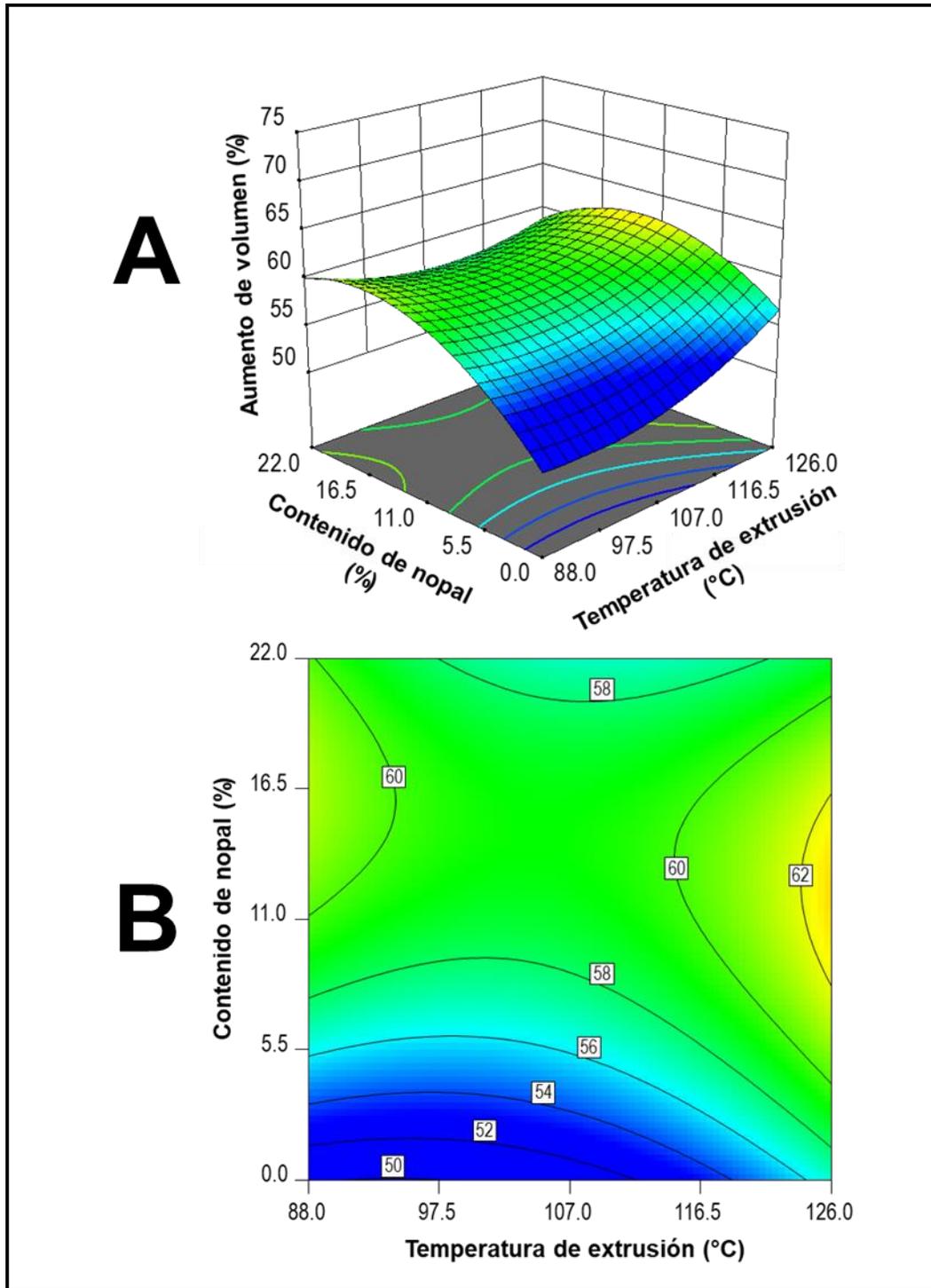
Igualmente, el factor contenido de humedad (H) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_2$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p < 0.001$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este también tuvo efecto significativo en su término lineal ( $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{33}$ ,  $p < 0.001$ ). En el análisis de interacciones, se obtuvo que las interacciones TE\*H ( $b_{12}$ ,  $p < 0.001$ ) y TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p < 0.001$ ) presentaron efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\begin{aligned} AV = & 59.04 + 0.66*TE - 1.49*H + 1.17*CN + 1.52*TE*H - 0.61*TE*CN - 0.28*H*CN \\ & + 0.82*TE^2 + 1.44*H^2 - 1.42*CN^2 \end{aligned}$$

En la **Figura 10** se muestra el efecto de la TE y CN sobre el AV de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. Puede apreciarse que se presentó un comportamiento tipo silla, donde los mayores valores de esta respuesta se obtuvieron a contenidos de nopal entre 11 y 16.5%, en el lomo de la silla, a lo largo de los niveles de TE estudiados. Los mayores valores de AV (65%) se presentaron a TE altas ( $> 116.5$  °C) en niveles intermedios de CN (11.0-16.5%). Este comportamiento podría deberse a una mayor modificación en la estructura del almidón en estas condiciones, facilitando la entrada de agua a las pastas y un aumento en su volumen, lo cual pudiera correlacionarse con el aumento de peso (AP), ya que los mayores valores de esta respuesta se presentaron en esta misma zona.

#### **d. Pérdida de sólidos por cocción (PSC)**

La pérdida de sólidos por cocción, que es una medida de la cantidad de sólidos perdidos en el agua de cocción, se considera un indicador importante de la calidad de la pasta (Gull y col 2015). La obtención de bajos valores de pérdidas de sólidos por cocción indica que la pasta cocida es de buena calidad (Del Nobile y col 2005).



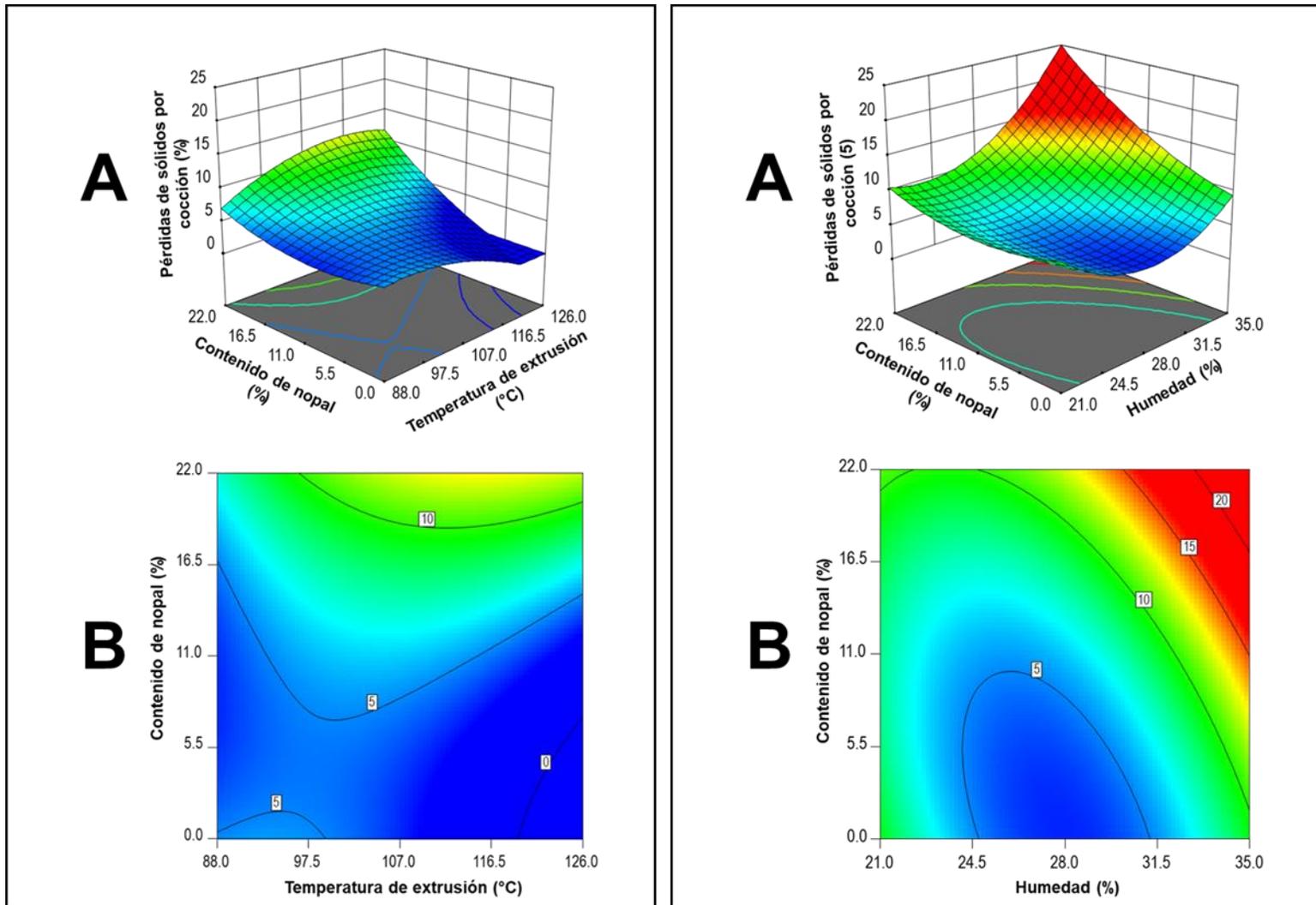
**Figura 10.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) sobre el aumento de volumen (AV) de pastas alimenticias libres de gluten (H= 28%). **A**, superficies y **B**, contornos.

Para el análisis de la variable de respuesta pérdida de sólidos por cocción (PSC) se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.94$ ,  $CV = 7.31\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.06$ ) (**Cuadro 10**). 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 ( $b_1$ ,  $p = 0.18$ ), pero sí presentó efecto en su término cuadrático ( $b_{11}$ ,  $p < 0.001$ ).

Igualmente, el factor contenido de humedad (H) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_2$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p < 0.001$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este tuvo efecto significativo en su término lineal ( $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{33}$ ,  $p = 0.01$ ). En el análisis de interacciones, se obtuvo que las interacciones TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p < 0.001$ ) y H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p < 0.001$ ) presentaron efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{PSC} = 6.24 - 0.31 \cdot \text{TE} + 2.25 \cdot \text{H} + 2.49 \cdot \text{CN} - 0.07 \cdot \text{TE} \cdot \text{H} + 1.02 \cdot \text{TE} \cdot \text{CN} + 1.12 \cdot \text{H} \cdot \text{CN} - 0.92 \cdot \text{TE}^2 + 1.82 \cdot \text{H}^2 + 0.63 \cdot \text{CN}^2$$

En la **Figura 11** se muestra el efecto de la TE y CN sobre las PSC de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. Se observa que los menores valores ( $< 4\%$ ) se presentaron a altas TE ( $> 107^\circ\text{C}$ ) y bajos CN ( $< 12.0\%$ ). Esto podría atribuirse a la formación de una estructura menos soluble durante el proceso de extrusión a altas temperaturas y bajos CN (Giménez y col 2013). Resultados similares fueron reportados por Larrosa y col (2016), quienes evaluaron las PSC en pastas libre de gluten a base de harina de maíz, reportando valores de 6.2 a 13.8%.



**Figura 11.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre la pérdida de sólidos por cocción (PSC) de pastas alimenticias libres de gluten. **A**, superficies y **B**, contornos.

Para que una pasta sea considerada de buena calidad debe presentar valores de pérdidas de sólidos por cocción  $< 12\%$  (Hoseney 1994). Sin embargo, en pastas libres de gluten, los polímeros de almidón pueden quedar atrapados de manera menos eficiente en la matriz debido a la falta de una red proteica, como la de gluten en trigo, lo que da un producto final con mayores pérdidas durante la cocción (Marti y Pagani 2013).

En la **Figura 11** se observa el efecto del contenido de H y CN sobre los valores de PSC, a una TE constante de  $107\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los menores valores de PSC ( $< 4\%$ ) se obtuvieron a bajo contenido de H ( $< 28\%$ ) y a bajos CN ( $< 12\%$ ).

Este comportamiento pudiera deberse a que en estas condiciones de proceso pudo aumentar la desnaturalización de la proteína y la disponibilidad del almidón y, por tanto, la susceptibilidad de estos componentes para formar complejos altamente agregados entre ellos, que contribuyeron a evitar la PSC (Granito y col 2003). Bousla y Wójtowicz (2021) reportaron un comportamiento similar en la elaboración de una pasta instantánea de arroz en donde reportaron los menores valores ( $< 5\%$ ) de PSC a bajos contenidos de humedad ( $28\%$ ).

### **3. Análisis fitoquímicos y biológicos**

En el **Cuadro 12** se muestra el análisis de varianza de las respuestas fitoquímicas, funcionales y biológicas evaluadas en las pastas libres de gluten, las cuales fueron contenido de clorofilas totales (CT), compuestos fenólicos totales (CFT), compuestos fenólicos de extractos libres (CFLib), compuestos fenólicos de extractos ligados (CFLig), actividad antioxidante por el método ABTS totales (ABTS T), actividad

**Cuadro 12.** Análisis de varianza de las respuestas fitoquímicas, funcionales y biológicas evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten elaboradas con harina de arroz quebrado y harina de nopal.

<b>Respuesta</b>	<b>R<sup>2</sup> (ajustada)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Valor F</b>	<b>p de F (Modelo)</b>	<b>Falta de ajuste</b>
<b>CT</b>	0.98	4.02	117.62	<0.01	0.07
<b>CFT</b>	0.98	3.78	266.81	<0.001	0.06
<b>ABTST</b>	0.90	3.50	21.54	<0.001	0.06
<b>DPPHT</b>	0.90	13.69	21.93	<0.001	0.06
<b>DeoxiLib</b>	0.81	4.79	10.30	0.0006	0.82
<b>DeoxiLig</b>	0.80	11.91	9.94	0.0006	0.19
<b>LDLLib</b>	0.95	3.05	47.34	<0.001	0.08
<b>LDLLig</b>	0.72	3.17	6.29	0.002	0.07

CV= Coeficiente de variación; CT= Clorofilas totales CFT= Compuestos fenólicos totales;; 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.

antioxidante por el método ABTS de extractos libres (ABTSLib), actividad antioxidante por el método ABTS de extractos ligados (ABTSLig), actividad antioxidante por el método DPPH totales (DPPHT), actividad antioxidante por el método DPPH de extractos libres (DPPHLib), actividad antioxidante por el método DPPH de extractos ligados (DPPHLig), inhibición del radical hidroxilo de extractos libres (DeoxiLib), inhibición del radical hidroxilo de extractos ligados (DeoxiLig), Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos libres (LDLLib), e inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad de extractos ligados (LDLLig). Los parámetros evaluados mostraron valores de  $R^2_{ajustada} \geq 0.72$ , coeficientes de variación (CV) entre 1.32 y 11.91, modelos significativos ( $p < 0.001$ ), y no presentaron falta de ajuste ( $p > 0.05$ ).

#### **a. Clorofilas totales (CT)**

Las clorofilas son un grupo de pigmentos sintetizados por organismos productores en la cadena trófica (plantas y algas) Ezquerria-Brauer y Chan-Higuera (2021). Las clorofilas tienen una alta capacidad antioxidante (Fernandes y col. 2017).

Para el análisis de la variable de respuesta clorofilas totales (CT), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.98$ , CV= 4.02%, sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.07$ ) (**Cuadro 12**). 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 ( $b_1$ ,  $p = 0.30$ ) pero sí presentó efecto en su término cuadrático ( $b_{11}$ ,  $p = 0.003$ ) (**Cuadro 13**). Asimismo, el factor contenido de humedad (H) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal ( $b_2$ ,  $p = 0.002$ ) y en su término cuadrático ( $b_{22}$ ,  $p = 0.01$ ).

**Cuadro 13.** Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las respuestas fitoquímicas y funcionales evaluadas en las pastas alimenticias libres de gluten.

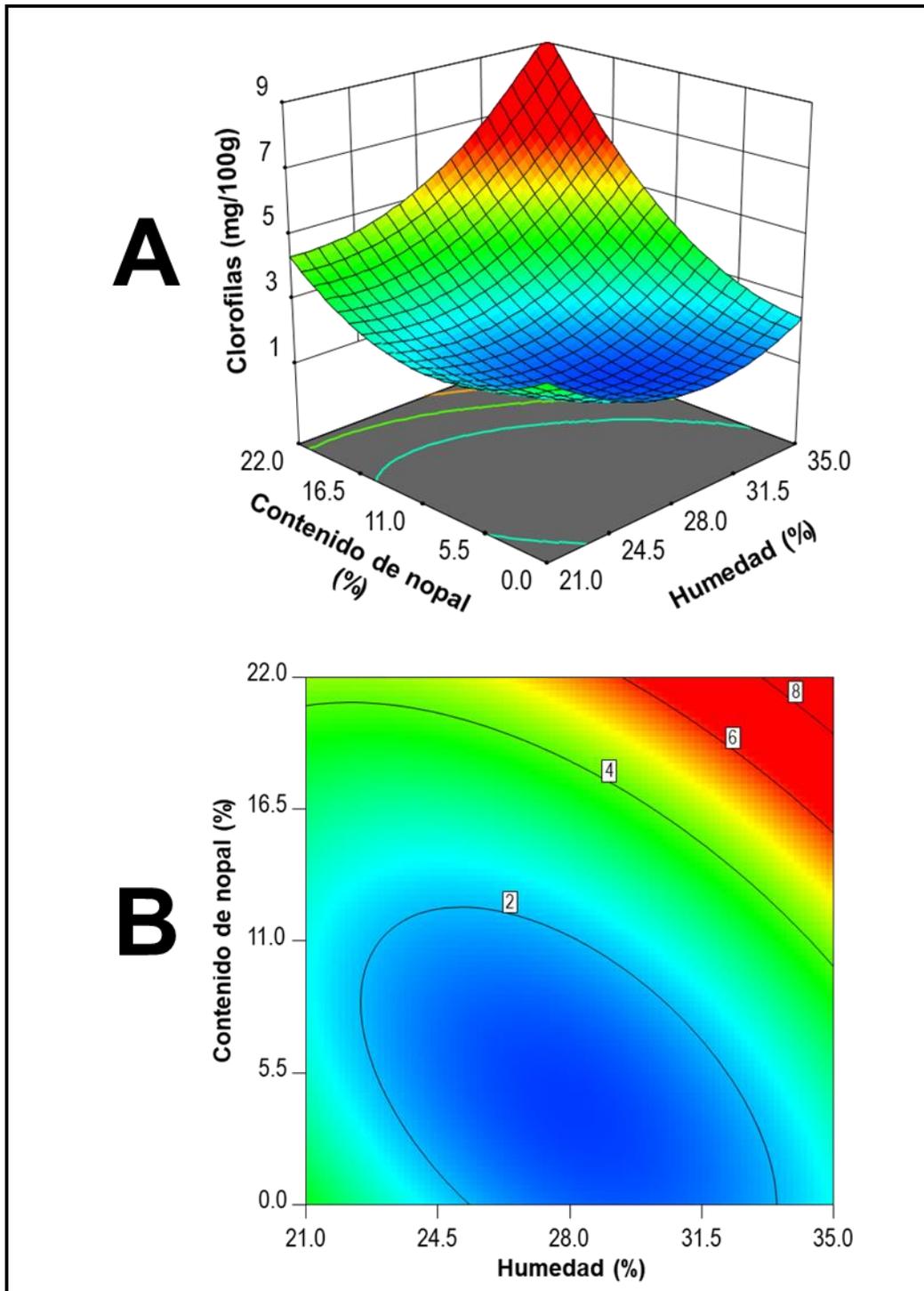
	CT	CFT	ABTST	DPPHT
<b>Intercepto</b>	2.15	1.12	9.75	3.72
<b>Lineal</b>				
TE (b <sub>1</sub> )	0.16 (0.30)	0.07 (<0.001)	0.03 (0.74)	0.15 (0.24)
H (b <sub>2</sub> )	0.62 (0.002)	0.17 (<0.001)	-0.15 (0.11)	0.46 (<0.001)
CN (b <sub>3</sub> )	1.21 (<0.001)	0.39 (<0.001)	1.006 (<0.001)	1.35 (<0.001)
<b>Cuadrático</b>				
TE (b <sub>11</sub> )	0.57 (0.003)	--	-0.13 (<0.001)	0.03 (<0.001)
H (b <sub>22</sub> )	0.45 (0.01)	--	-0.01 (0.02)	0.69 (<0.001)
CN (b <sub>33</sub> )	0.46 (0.01)	--	-0.10 (<0.001)	0.37 (<0.001)
<b>Interacciones</b>				
TE*H (b <sub>12</sub> )	0.18 (0.38)	0.02 (0.07)	0.32 (0.28)	0.48 (0.84)
TE*CN (b <sub>13</sub> )	0.17 (0.41)	0.09 (<0.001)	-0.23 (0.89)	-0.41 (<0.001)
H*CN (b <sub>23</sub> )	0.47 (0.04)	0.16 (<0.001)	-0.53 (0.39)	-0.49 (0.04)

CT= Contenido de clorofilas totales; CFT= Compuestos fenólicos totales; ABTS T= Actividad antioxidante por el método ABTS totales; DPPHT= Actividad antioxidante por el método DPPH totales; TE= Temperatura de extrusión; H= Contenido de humedad; CN= Contenido de harina de nopal

En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este presentó efecto significativo en su término lineal ( $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $b_{33}$ ,  $p = 0.01$ ). En el análisis de interacciones, se encontró que solamente la interacción H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p = 0.04$ ) presentó efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{CT} = 2.15 + 0.16 \cdot \text{TE} + 0.62 \cdot \text{H} + 1.20 \cdot \text{CN} + 0.18 \cdot \text{TE} \cdot \text{H} + 0.17 \cdot \text{TE} \cdot \text{CN} + 0.47 \cdot \text{H} \cdot \text{CN} \\ + 0.57 \cdot \text{TE}^2 + 0.45 \cdot \text{H}^2 + 0.46 \cdot \text{CN}^2$$

En la **Figura 12**, se muestra el efecto de la interacción H y CN sobre los valores de CT a una TE= 107 °C. Se obtuvieron los mayores valores de CT (> 6.0 mg/100g) a altos niveles de H (>28%) y altos CN (>16.5%). Esto podría estar relacionado a la mayor fluidez que ocurre durante el proceso de extrusión con alto contenido de humedad, presentándose menores tiempos de residencia, así como una menor degradación de la clorofila presente en las mezclas. La cocción por extrusión induce una alteración en las propiedades funcionales y en el contenido de compuestos bioactivos y su actividad antioxidante, que también depende de la materia prima y de numerosas variables, como la humedad de alimentación, la velocidad del tornillo y temperatura principalmente (Sarawong y col 2014). Los mayores valores de clorofilas a altos niveles de CN pudieron deberse al importante contenido de CT aportado por la harina de nopal, la cual fue la materia prima que presentó el mayor contenido, por lo cual al incrementarse su concentración en las muestras extrudidas aumentó el contenido de CT.



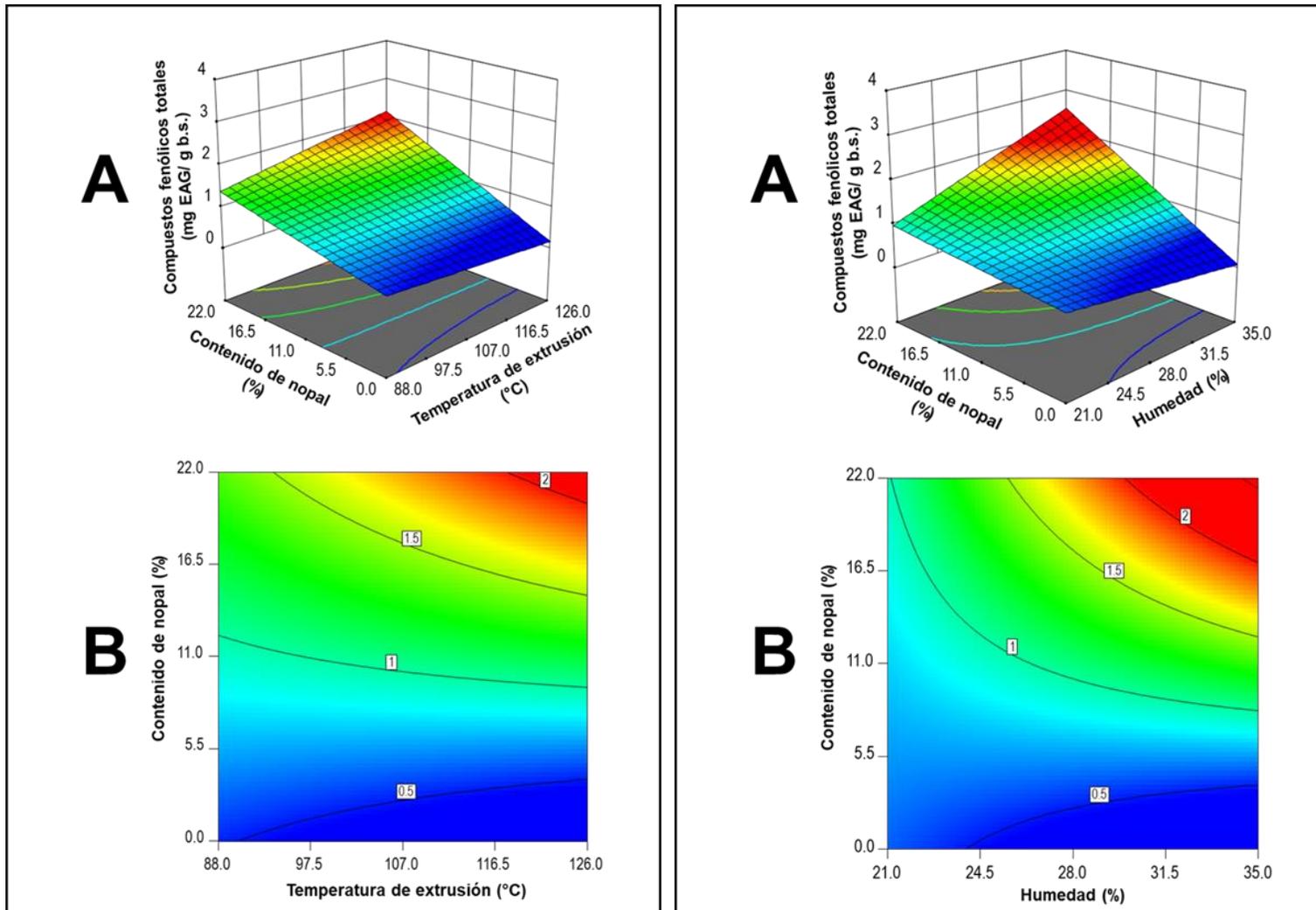
**Figura 12.** Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre el contenido de clorofilas totales (CT) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). **A**, superficies y **B**, contornos.

## **b. Compuestos fenólicos totales (CFT)**

Para el análisis de la variable de respuesta compuestos fenólicos totales (CFT) (CT), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.98$ ,  $CV = 3.78\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.057$ ) (**Cuadro 12**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que los 3 factores de estudio tuvieron efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE,  $b_{11}$ ,  $p < 0.001$ ), (H,  $b_2$ ,  $p < 0.001$ ), CN,  $b_3$ ,  $p < 0.001$ ). Asimismo, solamente presentaron efecto significativo las interacciones TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p < 0.001$ ) y H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p < 0.001$ ). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{CFT} = 1.12 + 0.07*TE + 0.17*H + 0.39*CN + 0.029*TE*H + 0.09*TE*CN + 0.16*H*CN$$

En la **Figura 13** se muestra el efecto de la TE y el CN sobre el contenido de CFT de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. Se puede observar que al incrementar el CN aumentó el contenido de CFT en todo el intervalo de TE estudiado. Asimismo, se obtuvo que a niveles elevados de CN ( $> 11\%$ ), al incrementar la TE, aumentó de forma importante el contenido de CFT. Los valores más altos de CFT ( $> 1.81$  mg EAG/g bs.) se presentaron a altas TE ( $> 107$  °C) y altos CN ( $> 17\%$ ). El contenido de CFT presentó una alta correlación positiva con el factor CN ( $r = 0.86$ ,  $p < 0.001$ ). Este comportamiento podría deberse al importante contenido de CFT que aporta el CN (12.33 mg EAG/g bs.), que fue superior al encontrado en la harina de arroz quebrado ( $0.98 \pm 0.42$  mg EAG/g bs.). Adicionalmente, durante el proceso de extrusión, las altas temperaturas y el cizallamiento pudieron provocar una modificación de estructuras, debido a la ruptura de los enlaces, generando la liberación de algunos compuestos, dejándolos más



**Figura 13.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) de pastas alimenticias libres de gluten. **A**, superficies y **B**, contornos.

disponibles para la extracción y cuantificación (Herrera-Cazares y col 2021). Palavecino y col (2018) elaboraron pastas alimenticias libres de gluten a base de arroz adicionadas con sorgo. Los resultados indicaron que las pastas cocidas con mayores niveles de sorgo blanco y marrón tuvieron un mayor contenido de compuestos fenólicos totales. Además, los compuestos fenólicos en las pastas obtenidas a partir de sorgo blanco y marrón, mostraron niveles intermedios de polifenoles, presentando los siguientes valores: control (pasta de arroz):  $0.37 \pm 0.01$  g EAG/kg; pasta de sorgo blanco:  $2.41 \pm 0.07$  g EAG/kg; pasta de sorgo café:  $2.88 \pm 0.05$  EAG/kg.

Jalgaonkar y col (2018) elaboraron pastas alimenticias a base de sémola adicionadas con harina de soya desgrasada (15%), zanahoria en polvo (10%), polvo de cáscara de mango (10%) y polvo de hojas de moringa (3%). La incorporación se consideró adecuada ya que incrementó considerablemente el contenido de compuestos fenólicos totales, presentando los siguientes valores: control:  $6.30 \pm 0.12$  mg EAG/100g, adicionada con 15% harina de soya:  $8.03 \pm 0.71$  mg EAG/100g; adicionada con 10% harina de zanahoria:  $7.63 \pm 0.27$  mg EAG/100g; adicionada con 10% harina de cáscara de mango:  $16.53 \pm 0.12$  mg EAG/100g; adicionada con 3% harina de hoja de moringa:  $17.98 \pm 0.22$  mg EAG/100g.

En la **Figura 13**, se muestra el efecto del contenido de H y CN (TE= 107°C) sobre los valores de CFT. Se puede observar que a al CN (>11 %) el contenido de CFT se incrementó en todo el intervalo de H estudiado. Similarmente, se puede observar que a H superiores a 25%, al incrementar el CN, el contenido de CFT se incrementó de manera importante. Los mayores valores de CFT (>1.81 mg EAG/g bs) se presentaron a altos contenidos de H (> 28%) y altos CN (> 17%). Esto podría

deberse a que algunos compuestos presentes en harina de nopal (pectinas, gomas y mucílagos) presentan efecto lubricante (Pai, Blake, Hamaker, & Campanella, 2009), aumentando la fluidez de las mezclas en el barril del extrusor, generando una menor degradación, por calor y cizallamiento de los compuestos fenólicos. Asimismo, altos niveles de H en las muestras pudieron haber causado un efecto protector durante el proceso de extrusión, provocando una menor degradación de compuestos (Ozer y col 2006).

Bousla y col (2019) optimizaron el proceso para la obtención de una pasta a base de arroz con adición de trigo sarraceno producida en un extrusor de tornillo simple. Los resultados mostraron un incremento del contenido de compuestos fenólicos en comparación con la pasta control con arroz, obteniendo los siguientes valores: pasta control (100 % arroz):  $0.04 \pm 0.01$  mg EAG/g; pasta óptima con arroz y trigo sarraceno:  $0.40 \pm 0.02$  mg EAG/g.

Turco y col (2019) evaluaron los niveles de compuestos fenólicos totales de pastas libres de gluten obtenidas a partir de harinas con 100% leguminosas: 100% harina de guisante y otra con 60% de harina de guisante y 40% harina de garbanzo. Los niveles de compuestos bioactivos (polifenoles totales y flavonoides) y las propiedades antioxidantes fueron mayores en todos los productos obtenidos con harinas de leguminosas, en comparación con la pasta de sémola de trigo duro.

Oniszczyk y col (2019) reportaron que el contenido de humedad tuvo un efecto importante sobre el contenido de CFT en la elaboración de pastas alimenticias. Estos autores concluyeron que niveles altos (>30%) de H favorecieron una mayor retención de CFT.

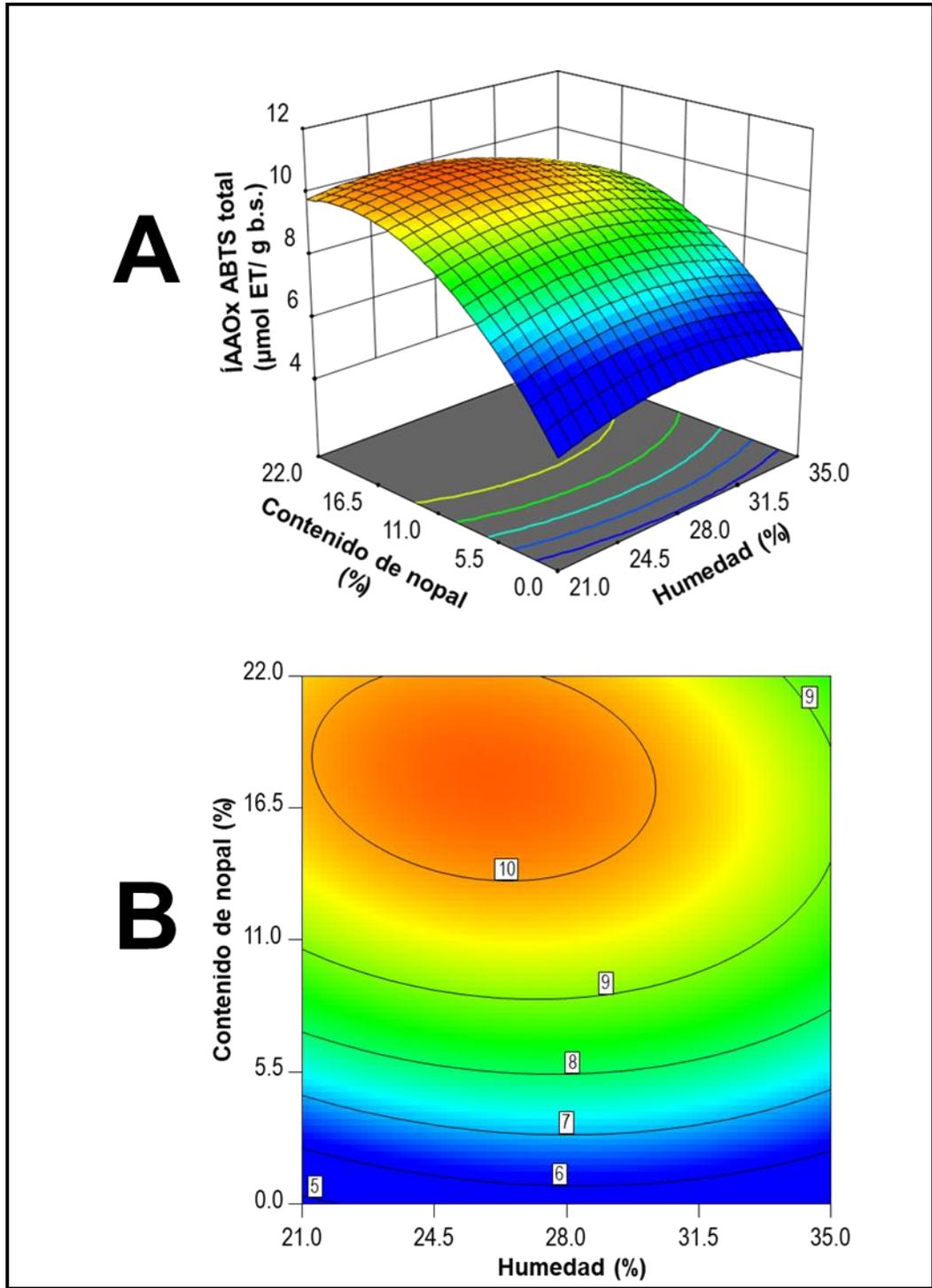
### c. Actividad antioxidante por el método ABTS totales (ABTST)

Se evaluó la actividad antioxidante medida por el radical ABTS en las materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas libres de gluten. Se obtuvo, que la harina de arroz quebrado presentó una actividad antioxidante (AAOx) de  $4.08 \pm 0.35$   $\mu\text{mol}$  equivalentes de trolox (ET)/g bs, mientras que la harina de nopal presentó una AAOx de  $25.47 \pm 0.49$   $\mu\text{mol}$  ET/g bs

Para el análisis de la variable de respuesta de actividad antioxidante por el método de ABTS totales (ABTST), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{\text{ajustada}} = 0.90$ ,  $\text{CV} = 3.50\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.06$ ) (**Cuadro 12**). 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,  $b_1$ ,  $p = 0.74$ ) pero sí mostró efecto en su término cuadrático (TE,  $b_{11}$ ,  $p < 0.001$ ). Igualmente, el factor de estudio contenido de humedad (H) no tuvo efecto significativo en su término lineal (H,  $b_2$ ,  $p = 0.11$ ) pero sí presentó efecto en su término cuadrático ( $H^2$ ,  $b_{22}$ ,  $p = 0.02$ ). En el caso del factor de harina de nopal (CN), este tuvo efecto significativo en su término lineal (CN,  $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $\text{CN}^2$ ,  $b_{33}$ ,  $p < 0.001$ ). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{ABTST} = 9.75 + 0.03 \cdot \text{TE} - 0.15 \cdot \text{H} + 1.006 \cdot \text{CN} - 0.13 \cdot \text{TE} \cdot \text{H} - 0.01 \cdot \text{TE} \cdot \text{CN} - 0.10 \cdot \text{H} \cdot \text{CN} + 0.32 \cdot \text{TE}^2 - 0.23 \cdot \text{H}^2 - 0.53 \cdot \text{CN}^2$$

En la **Figura 14**, se muestra el efecto de H y CN sobre los valores de AAOx por el método de ABTST<sup>++</sup>, en la cual se muestra que los valores más altos se obtuvieron a concentraciones bajas-intermedias de H (<31.5%) y niveles altos de CN (>16.5%). Esto podría deberse a que a bajos contenidos de humedad se genera mayor fricción



**Figura 14.** Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la actividad antioxidante ABTS total (ABTST) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107°C). **A**, superficies y **B**, contornos.

en el interior del extrusor, aumentando el tiempo de residencia, provocando estas condiciones severas de proceso, la liberación de compuestos con importante actividad antioxidante, que se podrían haber encontrados embebidos en las paredes celulares, aumentando su cuantificación.

Resultados similares fueron reportados por Chiu y col (2012), quienes reportaron una actividad antioxidante (ABTS<sup>•+</sup>) mayor en mezclas de maíz fortificadas con ñames chinos (*Dioscorea* spp.), después de someterlas al proceso de extrusión.

Padalino y col (2015) elaboraron una pasta adicionada con orujo de uva en la cual evaluaron la actividad antioxidante (ABTS<sup>•+</sup>), reportando un incremento asociado al proceso de extrusión, así como a la adición de materias primas ricas en compuestos bioactivos, ya que la pasta control presentó un valor de 4  $\mu\text{mol ET/g}$  mientras que la pasta adicionada con extracto de orujo de uva presentó un valor de 7  $\mu\text{mol ET/g}$ .

Por otro lado, se puede apreciar, que conforme se incrementó el CN aumentó la AAOx. Este comportamiento puede correlacionarse con el alto contenido de CFT encontrado en el presente trabajo en dichas condiciones, lo cual puede ser atribuido al importante contenido de CFT aportados por la harina de nopal.

Palavecino y col (2018) evaluaron la actividad antioxidante por el método ABTS<sup>•+</sup> en una pasta libre de gluten a base de arroz adicionada con diferentes vegetales (apio, cebolla y puerro), en la cual reportaron un incremento en la AAOx de la pasta adicionada con vegetales respecto a la pasta control.

#### **d. Actividad antioxidante por el método DPPH totales (DPPHT)**

Se evaluó la actividad antioxidante por el método DPPH totales en las materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas libres de gluten. Se obtuvo, que la harina de arroz quebrado presentó una actividad antioxidante (AAOx) de  $6.13 \pm 0.31$   $\mu\text{mol}$  equivalentes de trolox (ET)/g bs, mientras que la harina de nopal presentó una AAOx de  $43.18 \pm 0.34$   $\mu\text{mol}$  ET/g bs.

Para el análisis de esta variable de respuesta actividad antioxidante DPPH\* totales (DPPHT), de las pastas obtenidas por extrusión, se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{\text{ajustada}} = 0.90$ ,  $CV = 10.69\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.055$ ) (**Cuadro 12**). 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,  $b_1$ ,  $p = 0.24$ ), pero sí presentó efecto en su término cuadrático (TE,  $b_{11}$ ,  $p < 0.001$ ). Por otro lado, el factor contenido de humedad (H) presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (H,  $b_2$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $H^2$ ,  $b_{22}$ ,  $p < 0.001$ ). Asimismo, el factor contenido de harina de nopal (CN) tuvo efecto significativo en su término lineal (CN,  $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $CN^2$ ,  $b_{33}$ ,  $p = 0.01$ ). En el análisis de las interacciones, se obtuvo que la interacción TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p < 0.001$ ) presentó efecto significativo. El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{DPPHT} = 3.72 + 0.15*TE + 0.46*H + 1.35*CN + 0.03*TE*H + 0.69*TE*CN + 0.37*H*CN + 0.48*TE^2 - 0.41*H^2 - 0.49*CN^2$$

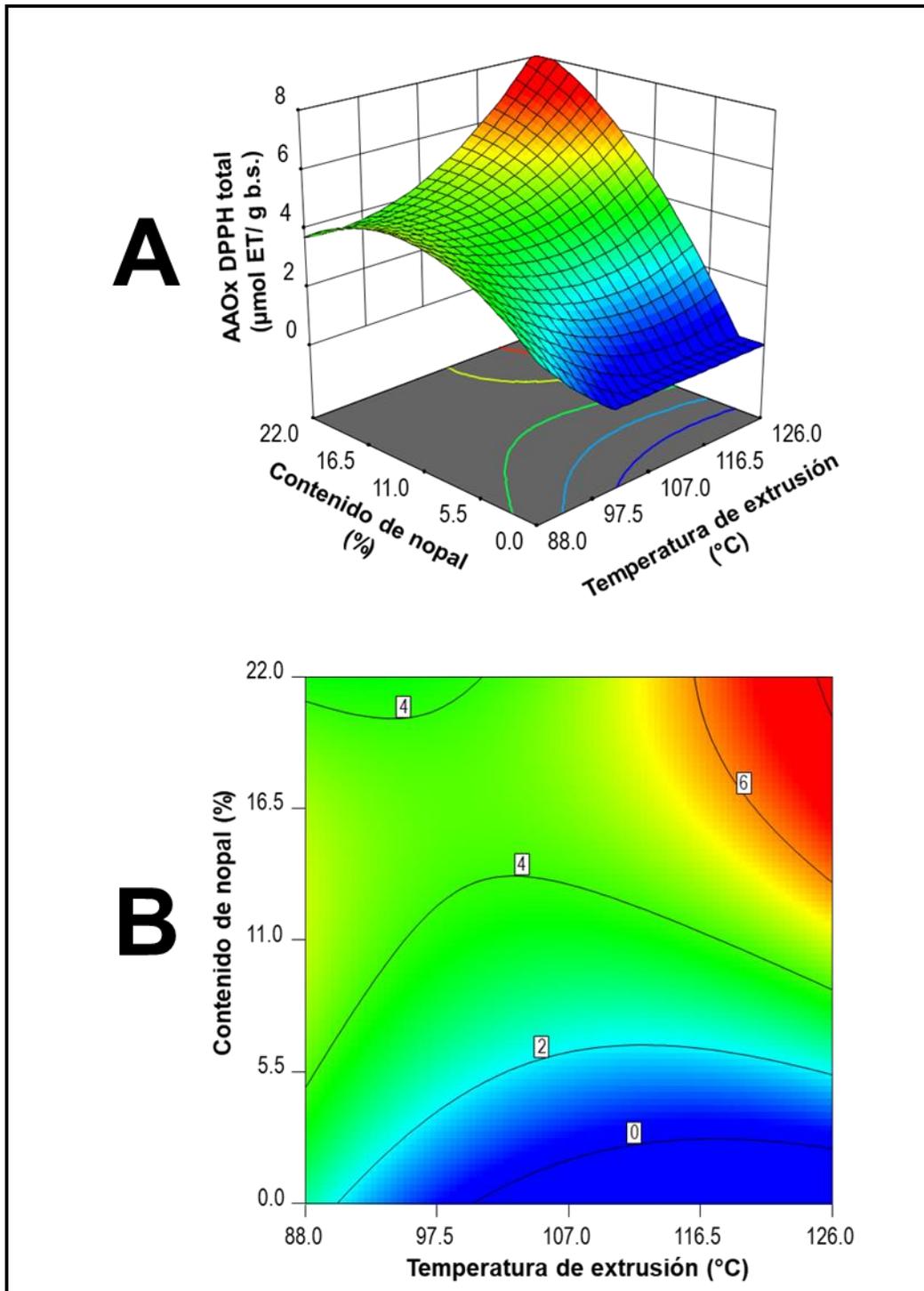
En la **Figura 15** se muestra el efecto de la TE y CN sobre la AAOx DPPHT de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. Se puede

apreciar que los mayores valores ( $> 6 \mu\text{mol ET/ g bs}$ ) se presentaron a altas TE ( $>116.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y altos CN ( $>16.5\%$ ). Resultados similares fueron reportados por Sharma y col (2012), quienes reportaron un incremento en la actividad antioxidante evaluada por el método DPPH<sup>\*</sup> en diferentes cultivares de harinas de cebada, atribuyendo dicho comportamiento al aumento de la TE, que provocó un incremento en la actividad quelante de metales.

En el presente estudio, la adición de una materia prima rica en compuestos bioactivos como la harina de nopal para la producción de pastas alimenticias, presentó un efecto significativo sobre los niveles de compuestos fitoquímicos. Esto concuerda con lo reportado por Loncaire y col (2016), quienes evaluaron la AAOx por el método DPPH<sup>\*</sup> en una pasta adicionada con harina de manzana. En dicho trabajo, los resultados mostraron que la pasta adicionada tenía niveles significativamente más altos de compuestos fenólicos y actividad antioxidante en comparación con la pasta en donde no se adicionó harina de cáscara de manzana.

Lorusso y col (2016) elaboraron una pasta alimenticia reemplazando el 20% de sémola de trigo con harina de quínoa fermentada y evaluaron los efectos de la sustitución sobre la AAOx por el método DPPH<sup>\*</sup> reportando un incremento con respecto a la pasta control sin quínoa.

Cota-Gastélum y col (2019) evaluaron la actividad antioxidante por el método DPPH<sup>\*</sup> en una pasta adicionada con harina de garbanzo y chíá, quienes reportaron un incremento en la AAOx en las pastas adicionadas con respecto al control. De



**Figura 15.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) sobre la actividad antioxidante DPPH total (DPPHT) de pastas alimenticias libres de gluten (H= 28%). **A**, superficies y **B**, contornos.

acuerdo con los autores, más del 85% de la capacidad antioxidante y más del 90 % de los compuestos fenólicos, de la pasta cocida se retuvieron tras la digestión *in vitro*, considerándose altos valores de retención.

#### **e. Actividad antioxidante por el método inhibición del radical hidroxilo de extractos libres (DeoxiLib)**

El radical hidroxilo es un radical libre extremadamente reactivo formado en sistemas biológicos, el cual es capaz de dañar la mayoría de las moléculas que se encuentran en las células vivas (Escutia-López y col 2020). Por otro lado, un antioxidante es una sustancia capaz de neutralizar la acción oxidante de los radicales libres mediante la liberación de electrones en el organismo, que son captados por los radicales libres (Avello y Suwalsky 2006). Las especies reactivas de oxígeno (ERO) comprenden tanto radicales libres como moléculas neutras (Genova y col 2001) y su generación en el organismo inicia con la reducción parcial del oxígeno molecular a través de la transferencia de un electrón durante la ruta de la fosforilación oxidativa, generando el anión radical superóxido ( $O_2^{\bullet-}$ ), que en un ambiente biológico, es transformado enzimáticamente a peróxido de hidrógeno, a partir de la enzima superóxido dismutasa, posteriormente, considerando la presencia de metales en el organismo como el  $Fe^{2+}$  a través de la reacción de Fenton (Fenton 1894) con la participación del peróxido de hidrógeno se podría formar el radical hidroxilo ( $\bullet OH$ ) (Dreher y Junod 1996).

En el presente estudio, se evaluó la capacidad antioxidante medida por la inhibición de oxidación del radical hidroxilo ( $\bullet OH$ ), en las materias primas utilizadas

para la elaboración de las pastas libres de gluten, así como con las pastas obtenidas en diferentes condiciones de procesamiento. Se obtuvo, que la harina de arroz quebrado presentó un valor promedio de capacidad de atrapamiento de este radical de  $30.18 \pm 0.14\%$  en la fracción libre y  $35.62 \pm 0.39\%$  en la fracción ligada, mientras que la harina de nopal presentó un valor promedio de atrapamiento de  $53.82 \pm 1.02\%$  en la fracción libre y  $49.96 \pm 0.22\%$  en la fracción ligada.

En el caso de las pastas obtenidas por extrusión, para el análisis de la variable de respuesta actividad antioxidante Deoxi libres (DeoxiLib), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.81$ ,  $CV = 4.79\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.82$ ) (**Cuadro 12**). El análisis estadístico de los datos dio como resultado que la temperatura de extrusión (TE) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (TE,  $b_1$ ,  $p = 0.01$ ), pero no presentó efecto en su término cuadrático (TE,  $b_{11}$ ,  $p = 0.23$ ). Asimismo, el factor contenido de humedad (H) no tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (H,  $b_2$ ,  $p = 0.07$ ) ni en su término cuadrático ( $H^2$ ,  $b_{22}$ ,  $p = 0.23$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este tuvo efecto significativo en su término lineal (CN,  $b_3$ ,  $p < 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $CN^2$ ,  $b_{33}$ ,  $p = 0.03$ ). En el análisis de las interacciones, se obtuvo que presentaron efecto significativo las interacciones TE\*H ( $b_{12}$ ,  $p = 0.04$ ) y H\*CN ( $b_{23}$ ,  $p = 0.04$ ) (**Cuadro 14**). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

**Cuadro 14.** Coeficientes de regresión de los modelos y niveles de significancia de las respuestas biológicas de las pastas alimenticias libres de gluten.

	DeoxiLib	DeoxiLig	LDLLib	LDLLig
<b>Intercepto</b>	27.77	13.29	67.37	43.59
<b>Lineal</b>				
TE (b <sub>1</sub> )	1.03 (0.01)	0.05 (0.92)	-0.65 (0.23)	6.77 (0.33)
H (b <sub>2</sub> )	0.69 (0.07)	-1.67 (0.01)	3.86 (<0.01)	-0.23 (0.54)
CN (b <sub>3</sub> )	2.70 (<0.01)	-0.81 (0.17)	8.98 (<0.01)	2.20 (<0.01)
<b>Cuadrático</b>				
TE (b <sub>11</sub> )	1.03 (0.23)	0.13 (0.03)	-2.36 (0.09)	--
H (b <sub>22</sub> )	-0.45 (0.23)	-1.32 (0.84)	-3.12 (<0.01)	--
CN (b <sub>33</sub> )	-1.06 (0.03)	0.72 (<0.01)	-0.67 (0.21)	--
<b>Interacciones</b>				
TE*H (b <sub>12</sub> )	-0.43 (0.04)	1.34 (0.85)	1.59 (0.04)	-0.03 (0.98)
TE*CN (b <sub>13</sub> )	0.431 (0.34)	0.11 (0.10)	2.39 (0.05)	-0.01 (0.98)
H*CN (b <sub>23</sub> )	-0.84 (0.04)	4.60 (0.34)	-0.53 (0.45)	0.59 (0.24)

DeoxiLib= Inhibición del radical hidroxilo de extractos libres; DeoxiLig= Inhibición del radical hidroxilo de extractos ligados; LDLLib= Inhibición de lipoproteínas de baja densidad de extractos libres y LDLLig= Inhibición de lipoproteínas de baja densidad de extractos ligados; TE= Temperatura de extrusión; H= Humedad; CN= Contenido de harina de nopal.

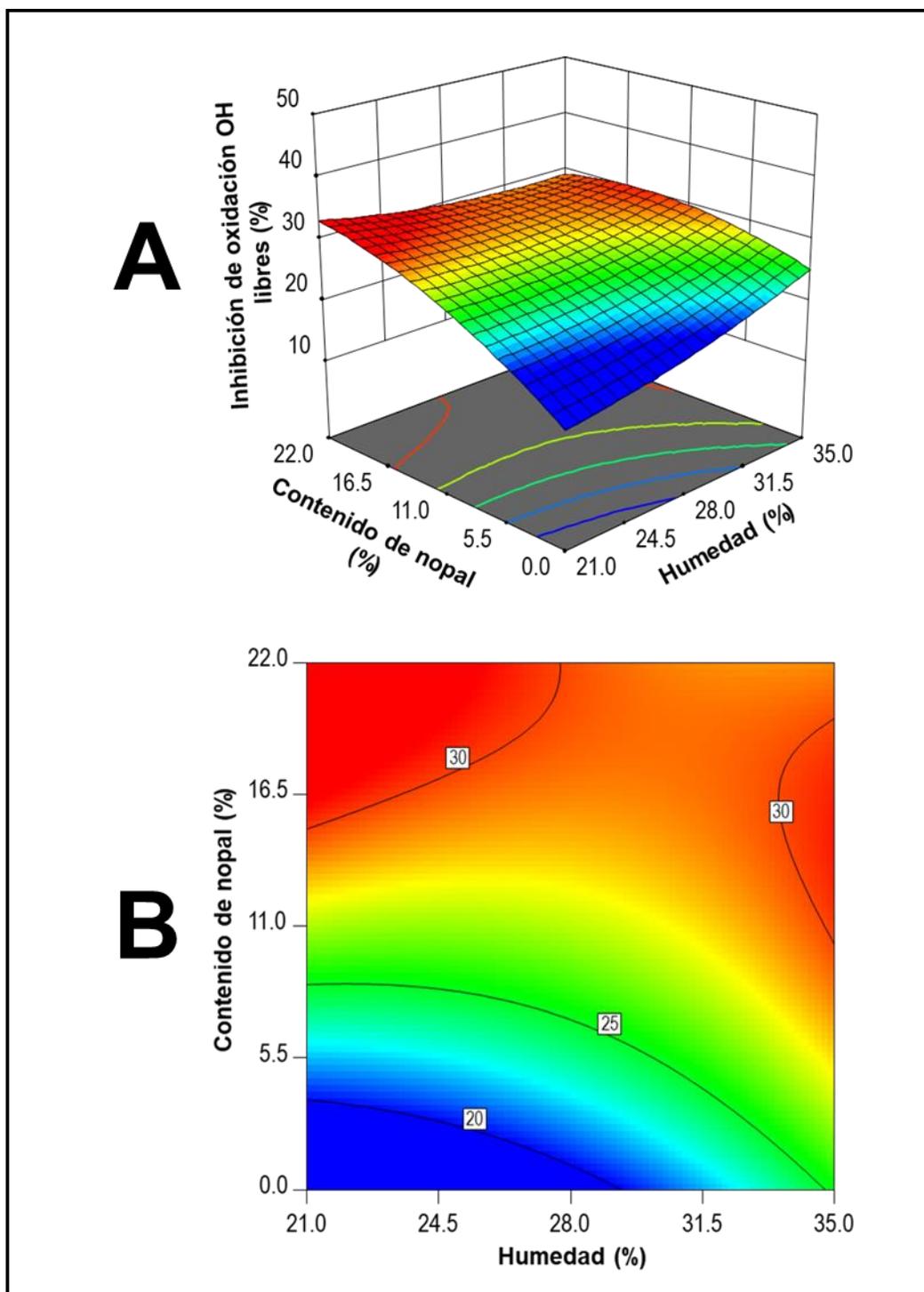
$$\text{DeoxiLib} = 27.77 + 1.03 \cdot \text{TE} + 0.69 \cdot \text{H} + 2.70 \cdot \text{CN} + 1.03 \cdot \text{TE} \cdot \text{H} - 0.45 \cdot \text{TE} \cdot \text{CN} - 1.06 \cdot \text{H} \cdot \text{CN} - 0.43 \cdot \text{TE}^2 + 0.431 \cdot \text{H}^2 - 0.84 \cdot \text{CN}^2$$

Por otra parte, en la **Figura 16** se puede observar el efecto de la interacción H y CN (TE= 107 °C) sobre los valores de la inhibición de oxidación del radical hidroxilo ( $\bullet$ OH). Se puede apreciar que los mayores valores de inhibición (>30%) se presentaron a altos CN (>16.5%) en todo el intervalo de humedad (H) estudiado. Este comportamiento puede atribuirse a la alta presencia de compuestos fenólicos con alta AAOx aportados por la harina de nopal, siendo mayor su capacidad de inhibir la oxidación del radical hidroxilo OH comparada con la harina de arroz quebrado.

Este comportamiento concuerda con lo reportado por Escutia-López y col (2020), quienes evaluaron la inhibición de oxidación del radical hidroxilo en extractos de hojas de Stevia (*S. rebaudiana* Bertoni), quienes encontraron que todos los extractos tuvieron actividad de eliminación de radicales hidroxilos, de una manera dependiente de la dosis. De acuerdo con Jahan y col (2010), las plantas contienen compuestos fenólicos cuyo grupo hidroxilo contenido en un anillo aromático puede interrumpir las reacciones de oxidación en cadena mediante la donación de un átomo de hidrógeno o metales quelantes, mismos que actúan como agentes reductores y antioxidantes, en donde altas cantidades de compuestos fenólicos indican mayor capacidad antioxidante.

#### **f. Actividad antioxidante por el método inhibición del radical hidroxilo de extractos ligados (DeoxiLig)**

Para el análisis de la variable de respuesta actividad antioxidante Deoxi ligados (DeoxiLig), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo

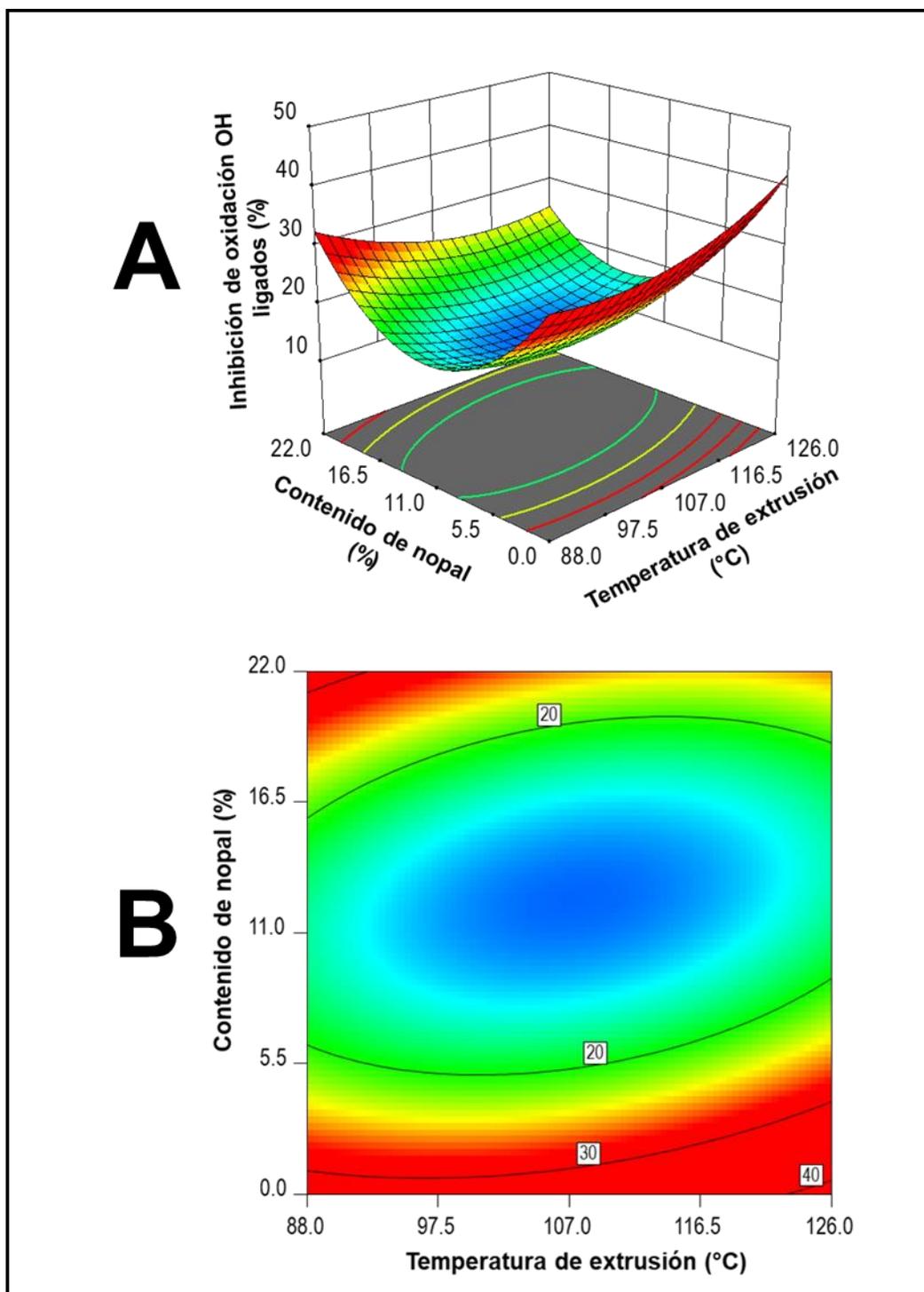


**Figura 16.** Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la inhibición de oxidación del radical OH de los extractos libres (DeoxiLib) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107 °C). **A**, superficies y **B**, contornos.

un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.80$ ,  $CV = 11.91\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.19$ ) (**Cuadro 12**). 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,  $b_1$ ,  $p = 0.92$ ) pero sí mostró efecto en su término cuadrático (TE,  $b_{11}$ ,  $p = 0.03$ ). Por otro lado, el factor contenido de humedad (H) mostró efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (H,  $b_2$ ,  $p = 0.01$ ) pero no presentó efecto en su término cuadrático ( $H^2$ ,  $b_{22}$ ,  $p = 0.84$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este no presentó efecto significativo en su término lineal (CN,  $b_3$ ,  $p = 0.17$ ) pero sí presentó efecto en su término cuadrático ( $CN^2$ ,  $b_{33}$ ,  $p < 0.001$ ). La interacción que presentó efecto significativo fue TE y CN (TE\*CN,  $b_{13}$ ,  $p = 0.04$ ) El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{DeoxiLig} = 13.29 + 0.054*TE - 1.67*H - 0.81*CN + 0.13*TE*H - 1.32*TE*CN + 0.72*H*CN + 1.34*TE^2 + 0.11*H^2 + 4.60*CN^2$$

En la **Figura 17** se muestra el efecto de la TE y CN sobre la actividad antioxidante inhibición del radical hidroxilo de extractos ligados (DeoxiLig) de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. Esta respuesta presentó un comportamiento tipo mínimo (~4%), en condiciones intermedias de TE (~100 °C) y de CN (~14%), fuera de este punto, los valores de DeoxiLig tienden a incrementarse. Se puede observar que los mayores valores (>30%) se obtuvieron en todo el rango de TE (88-126 °C) y a bajos (<5.5%) y altos CN (>16.5%). Este comportamiento concuerda con lo reportado por Delgado-Nieblas y col (2012) reportaron valores similares a los encontrados en la presente investigación, quienes evaluaron la inhibición del radical •OH en alimentos botana indirectamente expandidos elaborados a partir de harinas de maíz amarillo y calabaza Cehualca, reportando valores de inhibición de  $31.20 \pm 3.23\%$



**Figura 17.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) sobre la inhibición de oxidación del radical OH de los extractos ligados (DeoxiLig) de pastas alimenticias libres de gluten (H= 28%). **A**, superficies y **B**, contornos.

a  $39.94 \pm 0.01\%$  en los diferentes tratamientos. Esto podría deberse a que se presentó mayor cantidad de harina de maíz, indicando que el maíz posee una alta capacidad de atrapamiento del radical, debido a un alto contenido de compuestos fenólicos, tales como el ácido ferúlico (Rouau y col 2003).

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

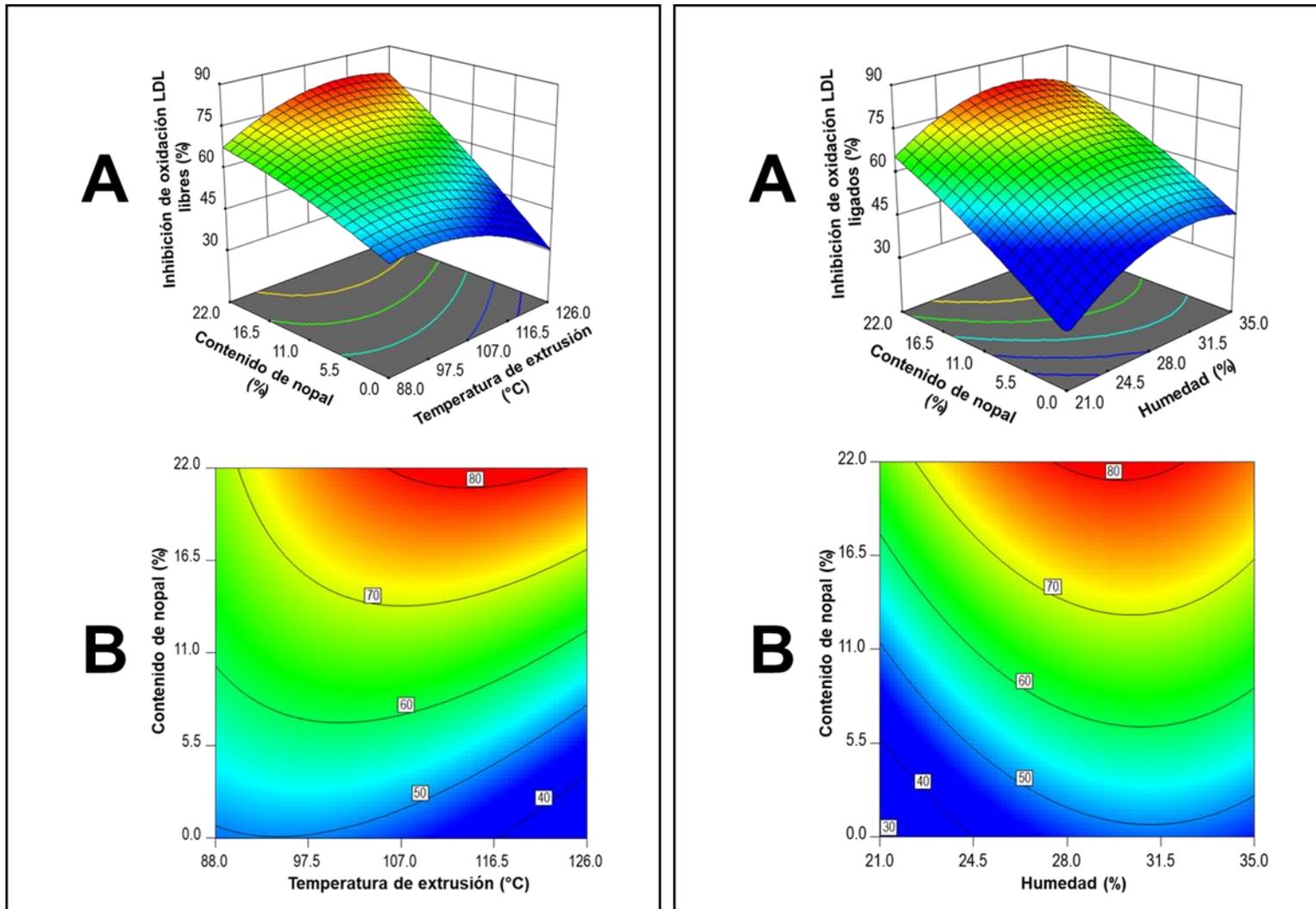
Las enfermedades cardiovasculares debidas a la aterosclerosis constituyen la principal causa de mortalidad a nivel mundial. Se han identificado una serie de factores de riesgo para padecer de estas enfermedades, uno de los principales son las dislipidemias, promoviendo el desarrollo de la aterogénesis (Degoricija y col 2022). Dentro de las dislipidemias, se cuentan un valor disminuido de colesterol-HDL (High-Density Lipoprotein–lipoproteína de alta densidad) y un valor aumentado de triglicéridos y de colesterol-LDL (Low-Density Lipoprotein–lipoproteína de baja densidad) (FERENCE y col 2017). Una dieta rica en antioxidantes podría disminuir las incidencias de las enfermedades cardiovasculares (Quiñones y col 2012). En diversos estudios (Schroeter y col 2006; Potenza y col 2007; Pérez-Vizcaino y col 2009) han demostrado que alimentos ricos en compuestos fenólicos tienen la capacidad de inhibir la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad.

Para el análisis de la variable de respuesta inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad libres (LDLLib), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.95$ ,  $CV = 3.05\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.08$ ) (**Cuadro 12**). 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,  $b_1$ ,  $p= 0.237$ ) pero sí presentó efecto significativo en su término cuadrático (TE,  $b_{11}$ ,  $p= 0.009$ ). Por otro lado, el factor contenido de humedad (H) tuvo efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal (H,  $b_2$ ,  $p< 0.001$ ) y en su término cuadrático ( $H^2$ ,  $b_{22}$ ,  $p< 0.001$ ). En el caso del factor contenido de harina de nopal (CN), este presentó efecto significativo en su término lineal (CN,  $b_3$ ,  $p< 0.001$ ) pero no mostró efecto en su término cuadrático ( $CN^2$ ,  $b_{33}$ ,  $p= 0.214$ ). En el análisis de las interacciones, se obtuvo que la interacción que presentó efecto significativo fue TE\*CN ( $b_{13}$ ,  $p= 0.005$ ). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{LDLLib} = 67.37 - 0.65*TE + 3.86*H + 8.98*CN + 1.58*TE*H + 2.39*TE*CN - 0.53*H*CN - 2.35TE^2 - 3.11*H^2 - 0.67*CN^2$$

En la **Figura 18** se muestra el efecto de la TE y CN sobre la inhibición de la oxidación LDLLib de las pastas alimenticias libres de gluten, a una H constante de 28%. En dicha figura, se observa que, al incrementar el contenido de nopal, la inhibición de la oxidación aumentó, en todo el intervalo de TE estudiado. Asimismo, en contenidos de nopal superiores a 11%, al incrementar la TE la inhibición de las LDLLib es mayor. Los mayores valores (>80%) se presentaron a altas TE (>107 °C) y altos CN (>16.5%). El porcentaje de inhibición presentó una alta correlación positiva, con el factor CN ( $r = 0.82$ ,  $p = < 0.001$ ) y CFT ( $r = 0.86$ ,  $p < 0.001$ ). Este comportamiento podría atribuirse a los compuestos fenólicos presentes en la harina de nopal y a su liberación por efecto de las TE. Los compuestos fenólicos, incluidos los flavonoides y los ácidos fenólicos, tienen alta capacidad de inhibir la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL) humanas *in vitro* (Zunt y col 2001). Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Rocha-Guzmán y col (2012), quienes estudiaron el % de inhibición en botanas extrudidas elaboradas con maíz amarillo y harina de



**Figura 18.** Efecto de la temperatura de extrusión (TE) y contenido de nopal (CN) (H= 28%), así como el efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) (TE= 107 °C) sobre la inhibición de oxidación LDL de extractos libres (LDLLib) de pastas alimenticias libres de gluten. **A**, superficies y **B**, contornos.

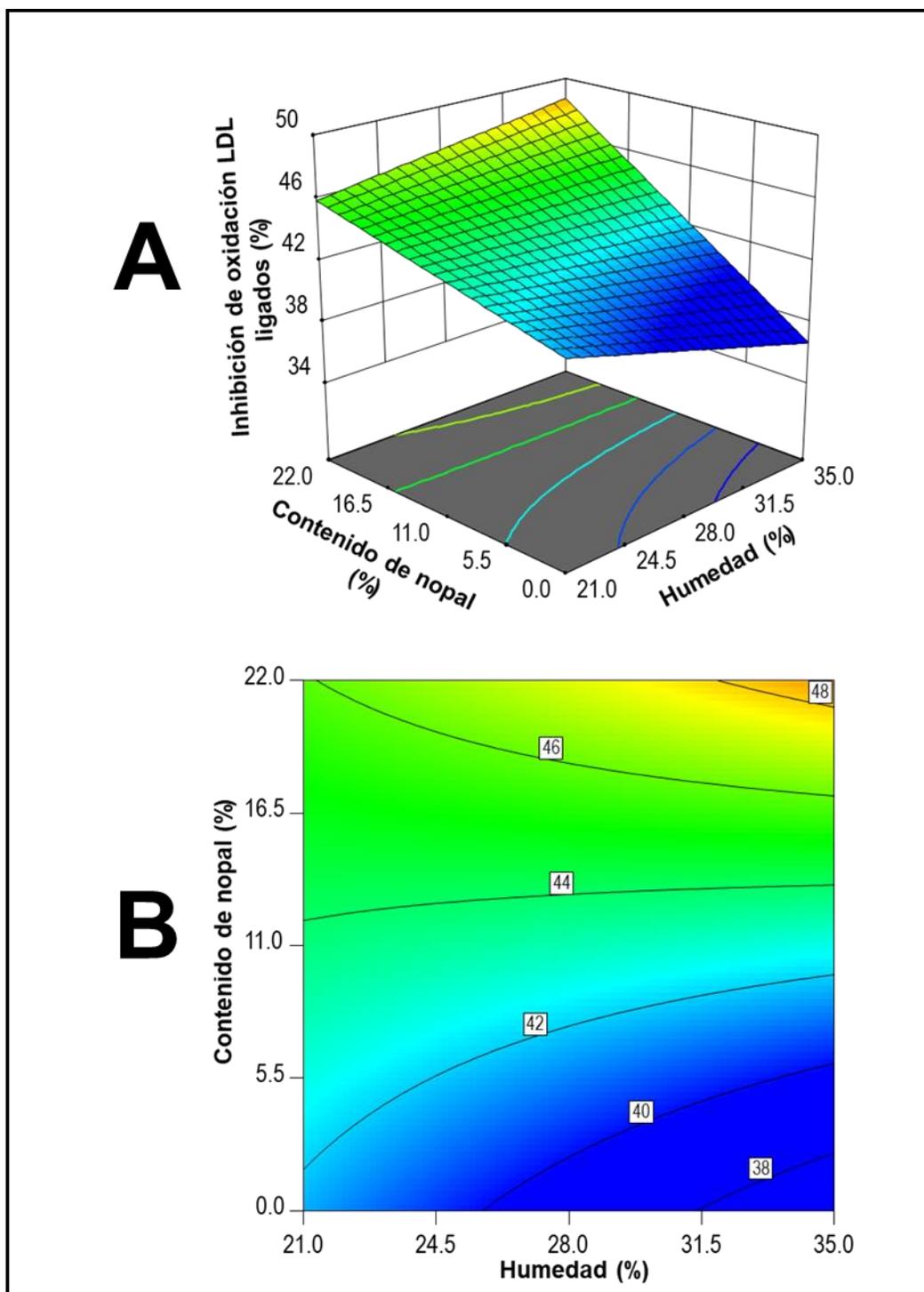
calabaza, en donde encontraron los mayores valores de inhibición de la oxidación de las LDL a altas TE combinadas con altos niveles de harina de calabaza.

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

Para el análisis de la variable de respuesta inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDLLig), se utilizó un modelo cuadrático que fue significativo ( $p < 0.001$ ), obteniendo un valor de  $R^2_{ajustada} = 0.72$ ,  $CV = 3.17\%$ , sin presentar falta de ajuste ( $p = 0.07$ ) (**Cuadro 12**). A partir del análisis estadístico de los datos se obtuvo que el factor de estudio contenido de harina de nopal (CN,  $b_3$ ,  $p < 0.001$ ), fue el único que presentó efecto significativo sobre esta respuesta en su término lineal. En el análisis de las interacciones, se obtuvo que la única interacción que presentó efecto significativo fue  $H*CN$  ( $b_{23}$ ,  $p = 0.04$ ). El modelo cuadrático completo obtenido fue el siguiente:

$$\text{LDLLig} = 43.58 + 0.37*TE - 0.23*H + 2.20*CN - 0.03*TE*H - 0.01*TE*CN + 0.594*H*CN$$

En la **Figura 19** se muestra el efecto de la H y CN (TE = 107 °C) sobre la inhibición de oxidación LDL de los extractos ligados (LDLLig) de las pastas alimenticias libres de gluten. Los mayores valores de inhibición de oxidación de LDLLig (> 48%) se presentaron a altos niveles de CN (> 16.5%). Este comportamiento podría atribuirse al incremento en el contenido de harina de nopal, debido a su alto contenido de compuestos fitoquímicos, tales como los compuestos fenólicos que son capaces de proporcionar importantes beneficios a la salud (Lacopetta y col 2021; Sciacca y col 2021; Moussaoui y col 2022). Álvarez-Parrilla y col (2012) evaluaron extractos de chile serrano y jalapeño y reportan que los ácidos fenólicos y flavonoides presentes en los extractos pueden actuar como antioxidantes naturales contra la oxidación del



**Figura 19.** Efecto del contenido de humedad (H) y contenido de nopal (CN) sobre la inhibición de oxidación LDL de extractos ligados (LDLLig) de pastas alimenticias libres de gluten (TE= 107 °C). **A**, superficies y **B**, contornos.

colesterol LDL humano. Thilakarathna y col (2013) estudiaron extractos de cáscara de manzana ricos en quercetina. Dichos autores mencionan que se redujeron las concentraciones plasmáticas de LDL oxidada de sujetos obesos con rasgos de síndrome metabólico, cuando consumieron los extractos producidos a partir de cáscara de manzana.

Diversas enfermedades crónicas degenerativas como el cáncer, hipertensión, obesidad y las enfermedades cardiovasculares pueden controlarse y prevenirse mediante dietas, incluyendo compuestos bioactivos presentes en la harina de nopal (Halmi y col 2013; Núñez-López y col 2013; Moran-Ramos y col 2012).

Hernández-Becerra y col (2022), afirman que el uso de harina de nopal podría favorecer la disminución de los parámetros relacionados con el metabolismo de los lípidos, como el colesterol LDL y los triglicéridos. Por el contrario, se observó un aumento del colesterol HDL (lipoproteínas de alta densidad) (Galati, Tripodo, Trovato, Aquino y Monforte, 2003).

#### **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) con adición de harina de nopal (HN), con las mejores propiedades de cocción, mayor contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) e inhibición de oxidación de las LDL. Para llevar a cabo la optimización, se eligieron las variables de respuesta de tiempo de cocción (TC), aumento de peso (AP), contenido de compuestos fenólicos

totales (CFT) e inhibición de oxidación de LDL libres (LDLLib). Se establecieron los criterios para cada una de las variables de respuesta (**Cuadro 15**), deseándose obtener los menores valores para la variable de TC, así como los mayores valores para AP, CFT y LDLLib. Se partió de las premisas de que TC y AP son uno de los principales parámetros para definir la calidad de las pastas alimenticias, mientras que se eligieron CFT y LDLLib debido a que la harina de nopal es una rica fuente de CFT, cuyo consumo podría tener potenciales beneficios a la salud, previniendo diferentes tipos de enfermedades.

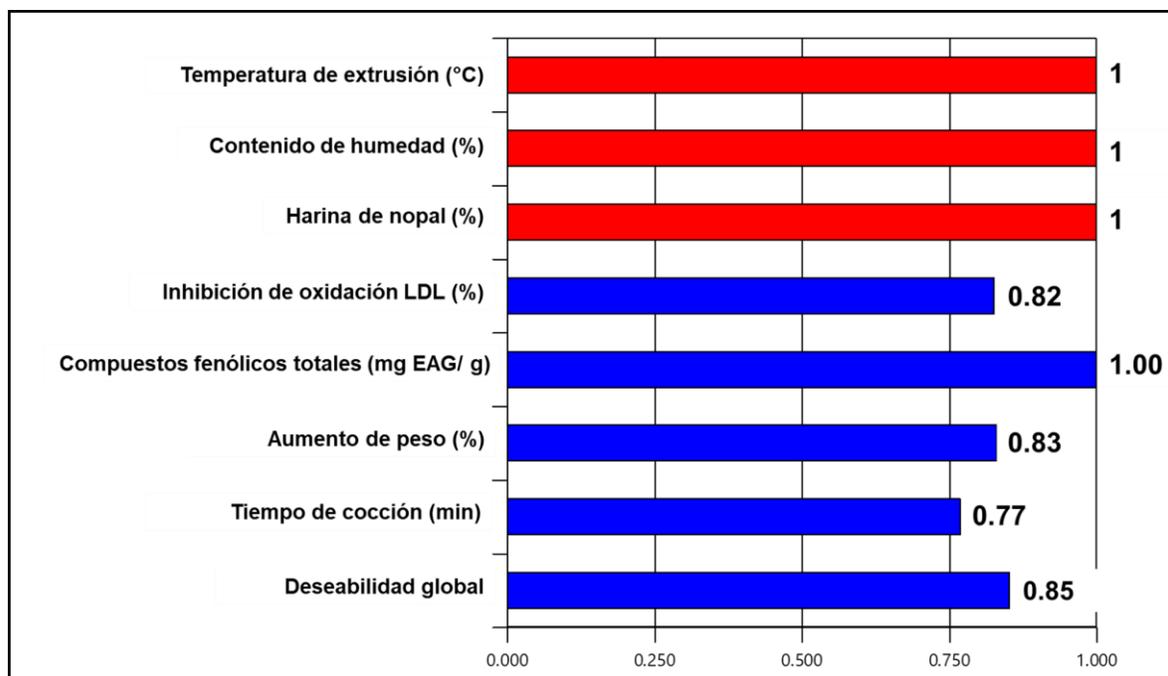
La **Figura 20** muestra las gráficas de barras de deseabilidad individual de cada una de las variables de respuesta utilizadas en la optimización, y la deseabilidad global o combinada del proceso. Se puede observar que la deseabilidad individual de los factores de estudio temperatura de extrusión, contenido de humedad y contenido de harina de nopal 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 TC mostró una deseabilidad de 0.77, indicando que alcanzó aproximadamente el 77% de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de TC. Asimismo, la variable de respuesta AP mostró una deseabilidad de 0.83, indicando que alcanzó aproximadamente el 83% de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de AP. La variable CFT mostró una deseabilidad de 1.0, que significa que alcanzó aproximadamente el 100% de la diferencia del límite superior menos el límite inferior de la variable CFT. Bajo este procedimiento, la inhibición de LDLLib, presentó

**Cuadro 15.** Criterios y límites para la optimización del proceso de extrusión de pastas alimenticias libres de gluten de arroz quebrado y nopal.

<b>Nombre</b>	<b>TE<sup>a</sup></b>	<b>H<sup>a</sup></b>	<b>CN<sup>a</sup></b>	<b>TC<sup>b</sup></b>	<b>AP<sup>b</sup></b>	<b>CFT<sup>b</sup></b>	<b>LDLLib<sup>b</sup></b>
<b>Objetivo</b>	Rango	Rango	Rango	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo
<b>Límite inferior</b>	88	21	1	8	205	1.3	60
<b>Límite superior</b>	126	35	22	12	237.2	2.03	80.46
<b>Importancia</b>	3	3	3	3	3	3	3
<b>Peso</b>	1	1	1	1	1	1	1

<sup>a</sup>Factores: TE=Temperatura de extrusión; H=Contenido de humedad; CN= Contenido de harina de nopal; <sup>b</sup>Variables de respuesta: TC=Tiempo de cocción; AP= Aumento de peso; CFT=Compuestos fenólicos totales; LDLLib= Inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad.



**Figura 20.** Deseabilidad individual y global (combinada) de las variables de proceso y respuestas analizadas durante la optimización del proceso para la obtención de pastas alimenticias libres de gluten por extrusión.

una deseabilidad de 0.82, siendo la deseabilidad global (DG) o combinada obtenida mediante 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.  $DG = (0.77 * 0.83 * 1.0 * 0.82)^{1/4}$ ,  $DG = 0.85$ .

Como resultado del presente estudio de optimización, se obtuvo que las mejores condiciones de procesamiento fueron:  $TE = 118$  °C,  $H = 31.7\%$ ,  $CN = 18\%$ , obteniéndose los siguientes valores predichos (**Cuadro 16**) por cada uno de los modelos matemáticos correspondientes:  $TC = 8.92$  min,  $AP = 231.79\%$ ,  $CFT = 1.62$  mg EAG/ g b.s. y  $LDLLib = 79.96\%$ . Para llevar a cabo la validación de los modelos matemáticos se elaboraron pastas alimenticias con las materias primas (harina de arroz quebrado + harina de nopal) utilizando las mejores condiciones de procesamiento obtenidas mediante optimización, mencionadas anteriormente. Con las pastas obtenidas en esta etapa, se llevaron a cabo los análisis de las pruebas de cocción, contenido de compuestos fenólicos totales e inhibición de LDLLib en las pastas obtenidas en las condiciones óptimas, obteniéndose los siguientes valores experimentales promedio y sus desviaciones estándar:  $TC = 9.5 \pm 0.3$  min,  $AP = 234 \pm 2.8\%$ ,  $CFT = 1.67 \pm 0.06$  mg EAG/ g bs, y  $LDLLib = 75.12 \pm 4.3\%$ .

Al comparar los valores experimentales obtenidos contra los valores predichos por los modelos matemáticos, se encontró que fueron muy cercanos entre sí para cada una de las variables de respuesta utilizadas en el proceso de optimización. Por tanto, los modelos utilizados demostraron tener un buen ajuste experimental, para encontrar las mejores condiciones del proceso de extrusión, en donde se obtuvieron pastas

**Cuadro 16.** 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 nopal

<b>Variables de respuesta</b>	<b>Valores predichos</b>	<b>Valores experimentales</b>
<b>Tiempo de cocción (min)</b>	8.92	9.5 ± 0.3
<b>Aumento de peso (%)</b>	231.79	234 ± 2.8
<b>Compuestos fenólicos totales (mg EAG/ g)</b>	1.62	1.67 ± 0.06
<b>AOO-LDL (% de inhibición)</b>	79.96	75.12 ± 4.3
<b>Media ± desviación estándar</b>		

alimenticias libres de gluten con buenas propiedades de cocción, alto contenido de CFT, e inhibición de oxidación de las LDLlib.

En el **Cuadro 17** se reportan los valores de diferentes características químicas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento (TE= 118 °C, H= 31.7%, CN= 18%). Es importante destacar que, aunque la pasta comercial de sémola de trigo (PCST) presentó el mayor contenido en proteína (presenta la desventaja del alto contenido en gluten que afecta a la salud de personas celíacas), en la pasta óptima (PO) se obtuvieron valores de cenizas y fibra cruda superiores de  $4.77 \pm 0.01$  y  $4.38 \pm 0.01$ , respectivamente, en comparación a la pasta control (PC), pasta comercial de arroz (PCA) y pasta comercial de sémola de trigo (PCST). Asimismo, en la PO se presentaron valores inferiores para carbohidratos de  $81.87 \pm 0.01$  en comparación con la PC y la PCA. En la determinación de los parámetros físicos y fisicoquímicos en las pastas (**Cuadro 18**), destacan aspectos positivos como los menores tiempos de cocción, así como mayores valores de aumento de peso obtenidos en la PO comparada con PCA y PCST. Sin embargo, los valores de pérdidas de sólidos por cocción fueron ligeramente superiores.

Por otro lado, se llevó a cabo la determinación del contenido de compuestos fitoquímicos, actividad antioxidante y biológica en las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento (**Cuadro 19**), observándose mayores valores para estos parámetros en PO comparado con PCA y PCST, lo cual es positivo debido a los potenciales efectos positivos en la salud de los consumidores el consumir alimentos ricos en compuestos antioxidantes.

**Cuadro 17.** Composición química (% bs) y valor energético (kcal/100g) de pasta óptima (PO) a base de arroz quebrado y nopal, pasta control (PC) a base de arroz quebrado, pasta comercial de arroz (PCA) y pasta comercial de sémola de trigo (PCST).

	PO	PC	PCA	PCST
<b>Humedad</b>	6.99 ± 0.01 <sup>d</sup>	10.99 ± 0.02 <sup>a</sup>	8.77 ± 0.12 <sup>c</sup>	10.8 ± 0.02 <sup>b</sup>
<b>Cenizas</b>	4.77 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.61 ± 0.03 <sup>d</sup>	0.75 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.88 ± 0.03 <sup>b</sup>
<b>Extracto etéreo</b>	0.08 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.02 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.01 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.2 ± 0.02 <sup>a</sup>
<b>Proteína</b>	1.91 ± 0.01 <sup>c</sup>	2.45 ± 0.4 <sup>b</sup>	3.0 ± 0.01 <sup>b</sup>	10.0 ± 0.01 <sup>a</sup>
<b>Fibra cruda</b>	4.38 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.46 ± 0.04 <sup>c</sup>	1.0 ± 0.01 <sup>d</sup>	3.0 ± 0.01 <sup>b</sup>
<b>Carbohidratos*</b>	81.87 ± 0.01 <sup>c</sup>	94.71 ± 0.02 <sup>a</sup>	87.0 ± 0.01 <sup>b</sup>	74.0 ± 0.01 <sup>d</sup>
<b>Valor energético</b>	375.84 ± 0.01 <sup>b</sup>	387.37 ± 0.01 <sup>a</sup>	360 ± 0.01 <sup>c</sup>	337.8 ± 0.02 <sup>d</sup>

\*Calculado por diferencia de 100; Los datos se presentan como media ± desviación estándar, los valores con diferentes letras en superíndice en la misma columna indican diferencia estadística significativa (prueba LSD,  $p \leq 0.05$ ).

**Cuadro 18.** Valores experimentales de propiedades físicas, fisicoquímicas y de cocción de pastas alimenticias a base de arroz quebrado y nopal obtenidas en condiciones óptimas (PO), pasta comercial de arroz (PCA) y pasta comercial de sémola de trigo (PCST).

	<b>PO</b>	<b>PCA</b>	<b>PCST</b>
<b>Índice de expansión</b>	0.85 ± 0.01	--	--
<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1644.69 ± 7.25	--	--
<b>Índice de solubilidad en agua (%)</b>	9.04 ± 1.05	8.50 ± 0.70	8.0 ± 1.02
<b>Índice de absorción de agua (g.a.a/ g.s.s.)</b>	3.47 ± 0.72	2.51 ± 0.25	3.34 ± 0.53
<b>Tiempo de cocción (min)</b>	9.0 ± 0.5	12.5 ± 0.03	10.0 ± 0.02
<b>Aumento de peso (%)</b>	234 ± 2.8	234.0 ± 1.2	212 ± 0.9
<b>Aumento de volumen (%)</b>	65.21 ± 1.02	62.03 ± 0.80	60.16 ± 0.39
<b>Pérdidas de sólidos por cocción (%)</b>	15.32 ± 0.27	13.91 ± 0.18	12.83 ± 0.36
<b>Color L*</b>	44.95 ± 0.81	--	--
<b>Color a*</b>	3.63 ± 0.15	--	--
<b>Color b*</b>	16.64 ± 0.31	--	--
<b>Diferencia total de color</b>	34.4 ± 0.51	--	--

Media ± desviación estándar

**Cuadro 19.** Valores experimentales de propiedades fitoquímicas y biológicas de pastas alimenticias de arroz quebrado y nopal obtenidas en condiciones óptimas (PO), pasta comercial de arroz (PCA) y pasta comercial de sémola de trigo (PCST).

	PO	PCA	PCST
<b>Clorofilas totales (mg/ 100 g)</b>	4.24 ± 0.21	--	--
<b>Compuestos fenólicos totales (mg EAG/ g)</b>	1.98 ± 0.12	0.84 ± 0.01	0.93 ± 0.03
<b>AAO-ABTS totales (mg ET/ g)</b>	4.30 ± 0.21	3.06 ± 0.03	3.89 ± 0.12
<b>AAO-DPPH totales (mg ET/ g)</b>	2.01 ± 0.02	1.14 ± 0.02	1.89 ± 0.01
<b>AAO-Deoxi libres (% de inhibición)</b>	30.79 ± 0.54	14.0 ± 0.33	26 ± 0.05
<b>AAO-Deoxi ligados (% de inhibición)</b>	16.49 ± 0.19	7.26 ± 0.10	11.59 ± 0.16
<b>AAO-LDL libres (% de inhibición)</b>	75.12 ± 4.3	39.12 ± 1.9	42.19 ± 2.1
<b>AAO-LDL ligados (% de inhibición)</b>	46.46 ± 1.85	23.17 ± 1.12	25.06 ± 1.11

Media ± desviación estándar

## 1. Análisis nutrimentales

### a. Fibra dietaria (FD)

En el **Cuadro 20** se observan los valores de fibra dietaria obtenidos en las materias primas utilizadas para la producción de las pastas libres de gluten. Se puede observar que la harina de nopal (HN) fue la que presentó el mayor contenido de fibra dietaria, con un valor de  $33.24 \pm 0.01\%$  de fibra dietaria total (FDT), de la cual  $18.93 \pm 0.06\%$  fue fibra dietaria insoluble (FDI), y  $14.24 \pm 0.10\%$  fue fibra dietaria soluble (FDS). Asimismo, la harina de arroz quebrado (HAQ) presentó un valor de FDT de  $2.25 \pm 0.01\%$ , de la cual  $1.34 \pm 0.01\%$  fue FDI y  $0.91 \pm 0.01\%$  fue FDS. La FD ha mostrado ser un componente de la dieta esencial para un estado óptimo de salud, relacionándose su consumo con la prevención de enfermedades no transmisibles como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares, así como los desórdenes gastrointestinales y su efecto beneficioso en el control de peso corporal (Almeida-Alvarado y col 2014). Sin embargo, su ingesta se encuentra por debajo de las recomendaciones por lo que es de suma importancia promover su consumo (Barber y col 2020). Los valores de FD de los productos obtenidos en las diferentes etapas de procesamiento (mezcla sin procesar, productos procesados) en la obtención de pastas alimenticias libres de gluten se muestran en el **Cuadro 21**. En la determinación de la fibra dietaria insoluble (FDI), el mayor valor lo presentó la pasta óptima procesada  $7.24 \pm 0.11\%$ , con respecto a la pasta control y la pasta comercial. Hubo un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) del  $14.92\%$  durante el proceso de extrusión con respecto a la pasta óptima sin procesar. Este comportamiento pudiera deberse a que durante el proceso de extrusión el cizallamiento pudo causar un estrés mecánico que causó el rompimiento de los

**Cuadro 20.** Contenido de fibra dietaria y digestibilidad *in vitro* de las materias primas utilizadas en la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten.

<b>Propiedades</b>	<b>Materias primas</b>	
	<b>Harina de arroz quebrado (HAQ)</b>	<b>Harina de nopal (HN)</b>
<b>Fibra dietaria (%)</b>		
<b>Fibra dietaria insoluble</b>	1.34 ± 0.01	18.93 ± 0.06
<b>Fibra dietaria soluble</b>	0.91 ± 0.01	14.24 ± 0.10
<b>Fibra dietaria total</b>	2.25 ± 0.01	33.24 ± 0.01
<b>DPIV (%)</b>	56.18 ± 0.23	60.30 ± 1.31

Media ± desviación estándar; DPIV= Digestibilidad proteínica *in vitro*

**Cuadro 21.** Contenido de fibra dietaria y digestibilidad *in vitro* de las pastas control (PC), pasta obtenida en condiciones óptimas (PO) en las diferentes etapas de procesamiento (mezcla sin procesar y producto extrudido) y pasta comercial de arroz (PCA).

Producto	Etapa del proceso	Fibra dietaria (% bs)			DPIV
		Fibra dietaria insoluble	Fibra dietaria soluble	Fibra dietaria total	
PC	<i>Mezcla sin procesar</i>	1.43 ± 0.12 <sup>a</sup>	0.98 ± 0.20 <sup>b</sup>	2.41 ± 0.32 <sup>b</sup>	56.2 ± 0.64 <sup>a</sup>
	<i>Producto extrudido</i>	1.78 ± 0.34 <sup>a</sup>	1.49 ± 0.13 <sup>a</sup>	3.27 ± 0.47 <sup>a</sup>	78.2 ± 0.23 <sup>b</sup>
PO	<i>Mezcla sin procesar</i>	6.30 ± 0.20 <sup>b</sup>	3.27 ± 0.16 <sup>b</sup>	9.57 ± 0.36 <sup>b</sup>	69.61 ± 0.71 <sup>a</sup>
	<i>Producto extrudido</i>	7.24 ± 0.11 <sup>a</sup>	5.02 ± 0.29 <sup>a</sup>	12.26 ± 0.40 <sup>a</sup>	84.39 ± 0.42 <sup>b</sup>
PCA	<i>Procesada</i>	0.68 ± 0.09	0.36 ± 0.18	1.04 ± 0.27	79.7 ± 0.78

bs= base seca. DPIV= digestibilidad proteínica in vitro, Los datos se presentan como media ± desviación estándar, los valores de fibra dietaria con diferentes letras en superíndice comparando la mezcla sin procesar y el producto extrudido indican diferencia estadística significativa (prueba LSD,  $p \leq 0.05$ ).

enlaces glicosídicos de la matriz fibrosa, aumentando así el contenido de fibra (Bender y col 2019). De igual manera la pasta óptima procesada fue la que presentó el mayor valor de fibra dietaria soluble (FDS,  $5.02 \pm 0.29\%$ ) (**Cuadro 21**) con respecto a la pasta control y la pasta comercial, presentándose un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) del 53.51% con respecto a la mezcla óptima sin procesar. Este incremento pudiera deberse a que durante el proceso de extrusión las altas temperaturas modifican la estructura original del material (Daou y Zhang 2012). Además, la solubilización de la fibra puede ocurrir dependiendo de la severidad del proceso (temperaturas de extrusión altas, contenido de humedad bajos). El estrés mecánico durante el proceso puede causar la degradación de los enlaces glucosídicos de los polisacáridos, lo que lleva a la liberación de oligosacáridos y; en consecuencia, el aumento de la fracción soluble (Vitaglione y col 2008). Asimismo, el contenido de fibra dietaria total (FDT) más alto lo presentó la pasta óptima procesada, con un valor de  $12.26 \pm 0.40\%$ , presentándose un incremento del 28.10% con respecto a la mezcla óptima sin procesar. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Stojceska y col (2010), quienes reportaron que la tecnología de extrusión tiene el potencial de aumentar los niveles de fibra dietaria total en productos sin gluten, elaborados a partir de cereales adicionados con frutas y verduras.

Cervini y col (2023) reportaron valores similares de FDT en una pasta elaborada a partir de sémola de trigo adicionada con almidón de arroz (15%), reportando un valor de  $12.9 \pm 1.31\%$ . La PO procesada obtenida en el presente estudio puede ser catalogada “alta en fibra” pues su contenido de fibra dietaria es mayor al 6% (Dello Ruso y col 2021).

## **b. Digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV)**

La DPIV es uno de los parámetros utilizados para medir el valor nutricional, debido a que la utilización biológica de la proteína, en cualquier producto alimenticio, depende principalmente de la digestibilidad (Herken y col 2006). Se evaluó la DPIV en las materias primas utilizadas para producir las pastas, se obtuvo que la harina de nopal (HN) fue la que presentó el valor más alto de DPIV, con un valor de  $60.30 \pm 1.31\%$ , mientras que la harina de arroz quebrado (HAQ) presentó un valor de DPIV de  $56.18 \pm 0.23\%$ . Los valores de DPIV para la PCA, mezcla sin procesar (PC), PC procesada, mezcla sin procesar (PO) y PO procesada fueron  $79.7 \pm 0.78$ ,  $56.2 \pm 0.64$ ,  $78.2 \pm 0.23$ ,  $69.61 \pm 0.71$ ,  $84.39 \pm 0.42$ , respectivamente. El proceso de extrusión incrementó significativamente ( $p < 0.05$ ) la DPIV en un 39.14% en la PC. Por otra parte, la PO tuvo un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) del 21.23% con respecto a la mezcla óptima sin procesar. Este comportamiento puede deberse a que durante el proceso de extrusión se favorece la desnaturalización de las proteínas haciéndolas más accesibles a la acción de las proteasas (Della Valle y col 1989) causando así un incremento en la DPIV.

Asimismo, durante el procesamiento el cizallamiento y las altas temperaturas causan una mayor desnaturalización de proteínas e inactivación de factores antinutricionales que dificultan la digestión (Morales y col 2015). Esta remoción/reducción de factores antinutricionales (ácido fítico, taninos, inhibidores enzimáticos) es debido a que estos son sustancias termolábiles y su actividad inhibitoria se puede reducir ampliamente mediante una temperatura adecuada. Valores similares a los encontrados en esta investigación fueron reportados por Herken y col (2006) en pastas adicionadas con harina de frijol caupí, quienes

reportaron una DPIV de  $79.4 \pm 0.82\%$ . Rachman y col (2022) estudiaron la DPIV en una pasta libre de gluten a base de harina de plátano (60%), adicionada con harina de yuca (25%) y aislado de proteína de soya (15%) reportando un valor de  $78.98 \pm 0.10\%$ . La diferencia entre los valores obtenidos en los estudios mencionados anteriormente comparados con los valores obtenidos en la presente investigación podrían deberse a las diferentes condiciones de procesamiento utilizadas para la elaboración de las pastas.

### **c. Perfil de aminoácidos**

El **Cuadro 22** muestra el contenido de aminoácidos esenciales de la mezcla óptima sin procesar y de la pasta óptima procesada, así como la calificación química de ambas. En general el contenido de aminoácidos esenciales de la mezcla optima sin procesar fue más alto que el sugerido por la FAO (2013), para el requerimiento de aminoácidos esenciales para niños (>3 años), adolescentes y adultos siendo únicamente Ile, Lys y Val los aminoácidos que no cumplen con el patrón de estándar de la FAO. La mezcla sin procesar presentó como aminoácido limitante en la pasta sin procesar a la Ile. El contenido de aminoácidos esenciales de la pasta óptima (PO) procesada aumentó significativamente ( $p < 0.05$ ), el cual cumple con el patrón estándar de la FAO (2013), con excepción de Lys el cual fue el aminoácido limitante, con un valor de 63.75%, ya que no alcanzaron a cubrir el 100% del requerimiento establecido, la Lys fue la que presentó mayor inestabilidad durante los procesos de extrusión resultando con el 99.36% de retención de dicho aminoácido. Singh y col (2007) reportaron una retención más baja (hasta 40%) en productos extrudidos elaborados con proteína de huevo y leche.

**Cuadro 22.** Perfil de aminoácidos esenciales en las pastas obtenidas de las condiciones óptimas de procesamiento en sus diferentes etapas (mezcla sin procesar y procesada).

Aminoácidos	Mezcla sin procesar		Procesado		FAO*
	g/ 100 g proteína	Calificación química	g/ 100 g proteína	Calificación química	
<b>His</b>	4.87 ± 0.03 <sup>a</sup>	100	2.27 ± 0.02 <sup>b</sup>	100	1.6
<b>Ile</b>	1.97 ± 0.15 <sup>b</sup>	59.1	3.59 ± 0.21 <sup>a</sup>	100	3.0
<b>Leu</b>	7.85 ± 0.34 <sup>a</sup>	100	8.38 ± 0.25 <sup>a</sup>	100	6.10
<b>Lys</b>	3.08 ± 0.09 <sup>a</sup>	64.16	3.06 ± 0.36 <sup>a</sup>	63.75	4.80
<b>Met</b>	0.77 ± 0.08 <sup>b</sup>	100	1.96 ± 0.13 <sup>a</sup>	100	1.6
<b>Thr</b>	3.19 ± 0.12 <sup>b</sup>	100	3.57 ± 0.14 <sup>a</sup>	100	2.5
<b>Val</b>	3.25 ± 0.25 <sup>b</sup>	81.25	5.50 ± 0.41 <sup>a</sup>	100	4.0
<b>Phe</b>	4.67 ± 0.12 <sup>a</sup>	100	4.97 ± 0.12 <sup>a</sup>	100	3.8
<b>Trp</b>	0.72 ± 0.01 <sup>a</sup>	100	0.76 ± 0.06 <sup>a</sup>	100	0.6
<b>Total</b>	29.65	--	34.06	--	--
<b>Calificación química</b>	59	--	63.75	--	--
<b>EAA limitante</b>	Ile	--	Lys	--	--

Los datos se presentan como media ± desviación estándar; EAA= 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 ( $p < 0.05$ ).

La retención de otros aminoácidos esenciales en dicho estudio varió del 80 al 100% (a 110 °C y 125 °C de temperatura del barril; 13 g/100 g–23.5 g/100 g de humedad del alimento). Esto fue atribuido a que todo tratamiento térmico puede promover una reducción de la retención de aminoácidos en los alimentos. Ananthanarayan y col (2022) reportaron que las pérdidas de aminoácidos esenciales durante el proceso de extrusión pueden deberse a la reacción de Maillard, siendo la principal preocupación en el desarrollo de un producto de alta calidad nutricional.

#### **d. Perfil de minerales**

En el **Cuadro 23** 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, 140.60 mg/100 g muestra), siendo estos valores menores a los encontrados en una pasta comercial de arroz (PCA) (Na, 250.00 mg /100 g muestra) y ligeramente mayores a los encontrados en una pasta comercial de sémola de trigo (Na, 100 mg / 100 g muestra); mientras que en el caso del potasio la PO presentó valores altos (K, 882.40 mg/100 g muestra) en comparación con una pasta comercial de sémola de trigo (PCST) (K,162 mg/ 100 g muestra). Se presentaron menores valores a los requerimientos diarios para adultos >19 años de acuerdo a la FAO en el caso de Na, K, Mg, Zn y Cu, presentando valores de 140.60, 882.40, 183.60, 4.08 y 0.96 mg/ 100 g de muestra respectivamente. Siendo favorable el contenido bajo de Na y K de acuerdo a la recomendación de Organización Mundial de la Salud (OMS 2013) que sugiere un consumo moderado de estos minerales, por posibles efectos en el desarrollo de enfermedades como la hipertensión arterial.

**Cuadro 23.** Contenido de minerales de la pasta obtenida en condiciones óptimas de procesamiento (PO), y requerimientos de ingesta diaria.

<b>Minerales</b>	<b>Pasta óptima (PO)</b>	<b>FAO*</b>
	<b>(mg/ 100 g)</b>	<b>(mg/ 100 g)</b>
<b>Na</b>	140.60	2000
<b>K</b>	882.40	3510
<b>Ca</b>	4420.00	1000
<b>Mg</b>	183.60	2600
<b>Fe</b>	45.80	14
<b>Mn</b>	2.81	2
<b>Zn</b>	4.08	7
<b>Cu</b>	0.96	1.5-3

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

## 6. Estudio *in vivo* de índice glicémico

El **Cuadro 24** muestra las características e indicadores bioquímicos para la admisión de los participantes que participaron en el estudio *in vivo* del índice glicémico.

La **Figura 21** muestra los resultados obtenidos de la determinación del índice glicémico en las pastas libres de gluten. Se puede observar el comportamiento presentado por las tres muestras analizadas, mediante la determinación del contenido de glucosa en sangre en diferentes tiempos, en sujetos sanos, posterior a la ingesta de cada una de las muestras estudiadas: 1. pan blanco (alimento estándar); pasta control cocida elaborada con harina de arroz quebrado (PC), y pasta óptima (PO) la cual presentó una sustitución del 18% con harina de nopal.

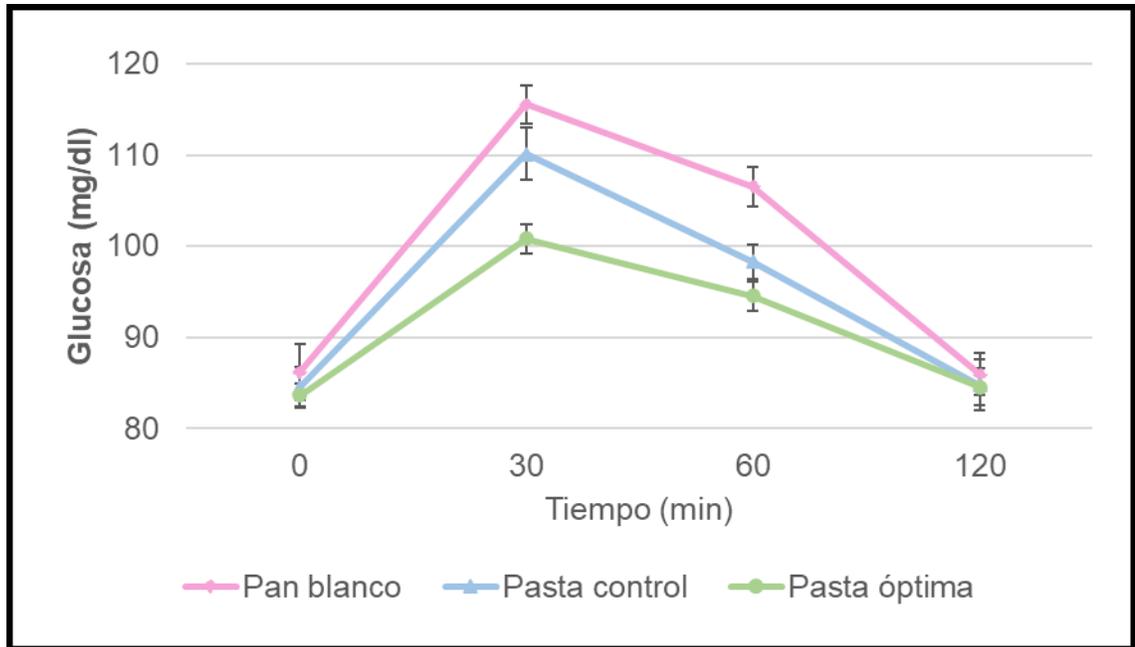
El mayor incremento de las curvas de glucosa se observó con el alimento estándar, a los 30 minutos, comenzando el descenso a partir de los 60 minutos y volviendo a su nivel basal (glicemia en ayunas), al finalizar el tiempo de prueba (120 minutos). Para la pasta control y la pasta óptima, se observó un comportamiento similar donde el incremento presentó un pico máximo de glucosa a los 30 minutos, siendo este menor al obtenido en el alimento estándar, seguido por un descenso gradual a partir de los 60 minutos y llegando nuevamente a su valor basal de inicio de la prueba a los 120 minutos.

La adición de harina de nopal favoreció la reducción del pico de hiperglucemia y la fase de hiperglucemia total (área bajo la curva) en la pasta óptima. La glucosa plasmática máxima se alcanzó durante los primeros 30 minutos, siendo los valores significativamente más bajos que la pasta control y el alimento estándar, la adición del nopal ayudó a mantener los niveles de glucosa moderados hasta por 120 min.

**Cuadro 24.** Características e indicadores bioquímicos de admisión de los participantes en el estudio *in vivo*.

<b>Indicadores</b>	<b>Resultado</b>
<b>N° de voluntarios</b>	12
<b>Sexo</b>	10 mujeres /2 hombres
<b>Edad (años)</b>	20 ± 2
<b>Peso (kg)</b>	56.73 ± 1.43
<b>Altura (m)</b>	1.62 ± 0.2
<b>IMC (kg/m<sup>2</sup>)</b>	21.6 ± 0.17
<b>Glucosa inicial</b>	82.38 ± 1.27
<b>(mg/dL)</b>	

Los datos se presentan como media ± desviación estándar  
IMC= Índice de masa corporal



**Figura 21.** 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).

Las concentraciones máximas de glucosa plasmática fueron de  $115.56 \pm 2.2$  mg/dl,  $110.14 \pm 1.6$  mg/dl y  $100.8 \pm 2$  mg/dl para el alimento estándar, pasta control y pasta óptima, respectivamente, a los 30 minutos después de su ingesta.

El índice glicémico obtenido para la pasta control (PC) fue de  $76.70 \pm 2.01$ , considerado como un alimento de índice glicémico alto. La pasta óptima con 18% de harina de nopal presentó una disminución del IG del 21.98%, con relación a la pasta control.

En relación a la carga glicémica, tanto la pasta control como la pasta óptima presentaron una carga glicémica alta ( $36.32 \pm 1.18$  y  $22.87 \pm 1.26$  respectivamente). Sin embargo, esta carga fue mayor (13.45% aproximadamente) para la pasta control, que para la pasta óptima.

El índice glicémico para la pasta control y la pasta óptima se encontró dentro del rango normal de carbohidratos de absorción lenta e intermedia, siendo el IG significativamente menor para las pastas óptimas (adicionada con 18% de nopal). Esto se puede atribuir al IG bajo reportado en estudios previos para el nopal. López-Romero y col (2014) realizaron un estudio en pacientes mexicanos con diabetes tipo II, en donde se evaluó el efecto del consumo de nopal en el desayuno sobre el IG, observándose un IG bajo ( $32.5 \pm 0.02$ )

## **7. Detección de gliadinas**

En el **Cuadro 25** se muestra la detección de gliadinas en la mezcla control y óptima sin procesar, así como en las muestras procesadas: pasta control (PC), pasta óptima (PO), pasta comercial de arroz (PCA), y pasta comercial de sémola de trigo (PCST). En las mezclas sin procesar (control y óptima), así como en la PC y PO elaboradas

**Cuadro 25.** 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)	(Positivo)	
PCST	P				
	(Positivo)	(Positivo)	(Positivo)	(Positivo)	

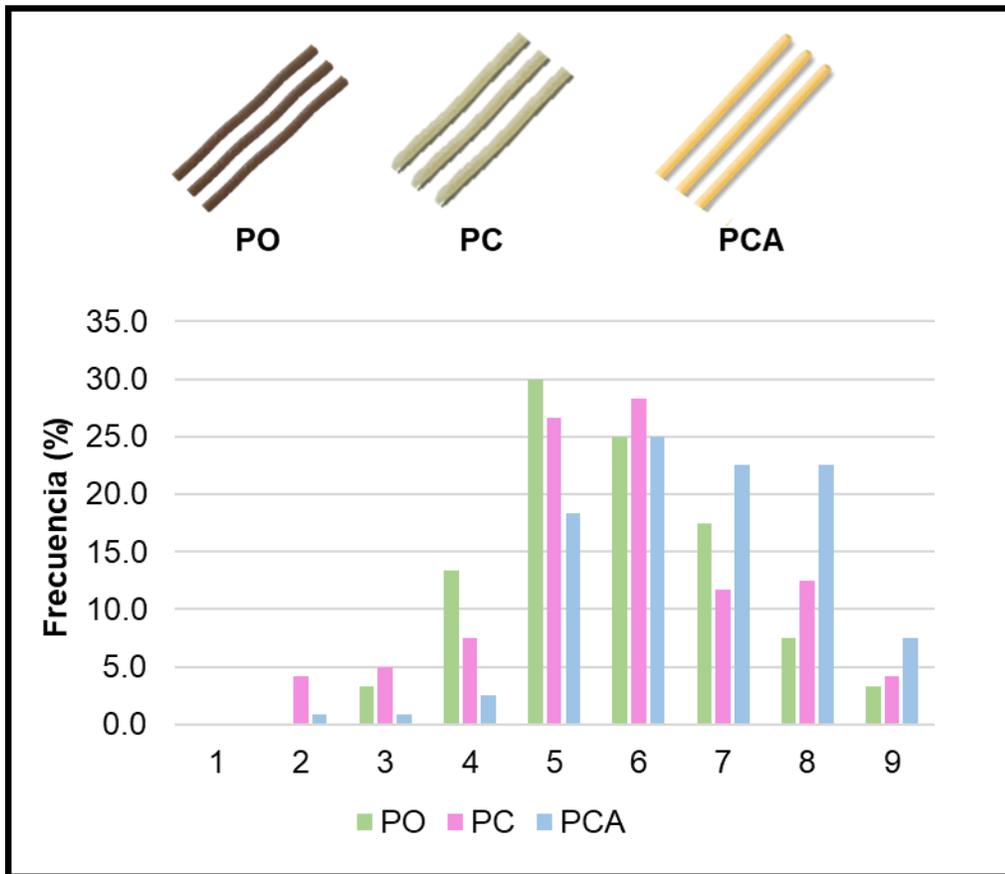
ppm= partes por millón, MSP= mezcla sin procesar, P= procesada.

con arroz quebrado y arroz quebrado con nopal, respectivamente, no se detectaron gliadinas en 5, 10, 15 y 20 ppm. Esto se puede atribuir a las materias primas utilizadas para su elaboración que no contienen gluten. Mientras que en el caso de la PCA no se detectaron gliadinas a 5, 10 y 15 ppm, pero sí se detectaron 20 ppm. Esto pudo ser generado por contaminación cruzada del equipo donde se procesó esta pasta comercial. Asimismo, en la PCST se detectaron gliadinas a 5, 10, 15 y 20 ppm, lo que se atribuye a que la materia prima sémola de trigo presenta altas cantidades de gluten. Thompson y Simpson (2014) reportaron que para que un alimento sea considerado libre de gluten de acuerdo a las normativas internacionales, debe contener menos de 20 ppm de gluten.

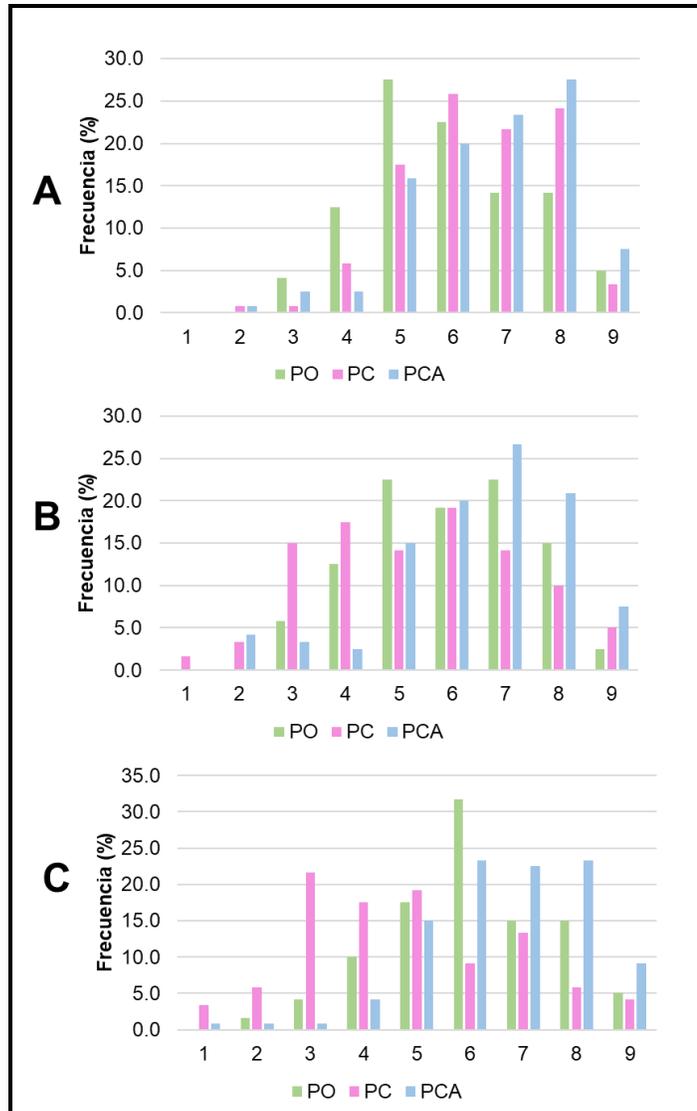
## **8. Análisis sensorial**

En la **Figura 22** se observan los resultados obtenidos del estudio de aceptabilidad sensorial de las pastas alimenticias. En el análisis de aceptabilidad general, se observó que 85% de los panelistas seleccionaron valores de la escala hedónica  $\geq 5$  en la PO. Asimismo, en PC el 83.3% de los panelistas indicaron un grado de aceptación  $\geq 5$ . Por otro lado, en la PCA, el 95.8% de los panelistas indicaron valores de aceptación  $\geq 5$ . En el análisis de comparación de medias, no se observaron diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ) entre la PO y la PC, pero sí entre ambas y PCA, donde PCA obtuvo la mayor aceptación por parte de los panelistas seguido por la PO.

En la evaluación por atributos (**Figura 23**), la PO presentó la menor aceptabilidad para el parámetro de color, donde el 83.3% de los evaluadores eligió valores  $\geq 5$ , presentando diferencia significativa (LSD,  $p \leq 0.05$ ) en comparación con la PC y PCA, mientras que no se encontró diferencia significativa (LSD,  $p > 0.05$ ) entre PC (92.5%)



**Figura 22.** Análisis de frecuencia de la 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 nopal; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial de arroz).

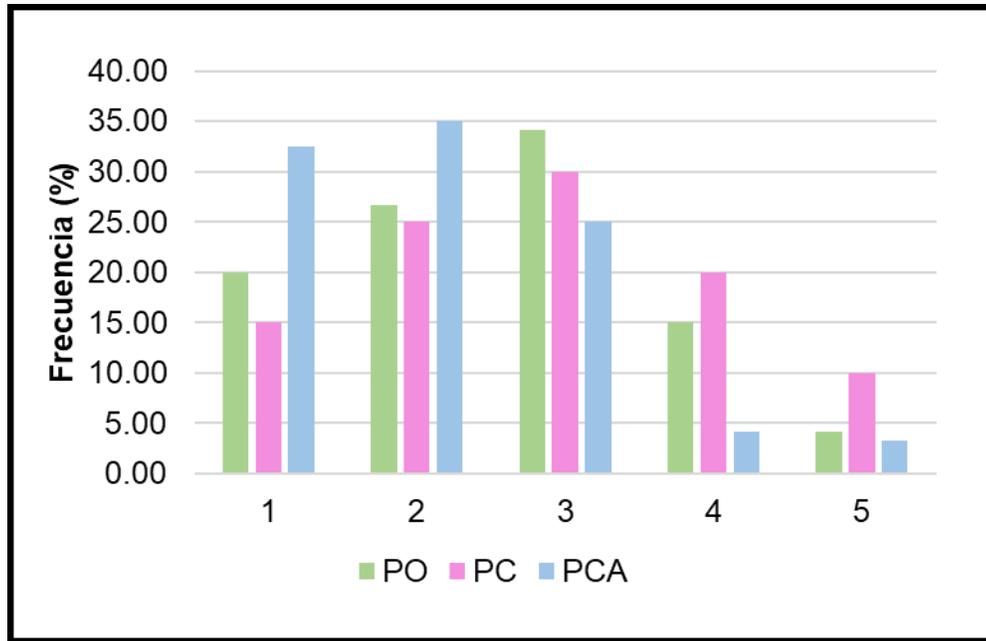


**Figura 23.** Análisis de frecuencia de la prueba aceptabilidad por atributos (**A**= color, **B**= sabor, **C**= textura) (1= me disgusta extremadamente, 2= me disgusta mucho, 3= me disgusta moderadamente, 4= me disgusta, 5= ni me gusta ni me disgusta, 6= me gusta, 7= me gusta moderadamente, 8= me 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 nopal; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial de arroz).

y PCA (94.2%). Por otro lado, para el atributo de sabor, las PO y PCA presentaron altos valores de aceptación por los panelistas, presentando la PO un valor de aceptabilidad de 81.4%, PCA 90.0%, y PC un valor de 62.5%, presentándose diferencia significativa (LSD,  $p \leq 0.05$ ) entre las tres. Por otro lado, para el atributo de textura, se presentó diferencia significativa (LSD,  $p \leq 0.05$ ) entre PO (84.2%), PC (51.7%) y PCA (93.3%), mostrando PCA la mayor aceptabilidad.

En el análisis sobre la probabilidad de compra (**Figura 24**), las tres pastas presentaron valores positivos, donde se observó que el 80.83% de los panelistas indicaron que probablemente comprarían la PO, el 70.0% la PC, y el 92.50% la PCA, presentándose diferencia significativa (LSD,  $p \leq 0.05$ ) entre las pastas.

Los resultados generales obtenidos del estudio de aceptabilidad sensorial indicaron que la PCA presentó la más alta aceptabilidad general, sabor y textura. Esto podría deberse al hecho de que algunos productos comerciales pueden contener aditivos en sus formulaciones, lo que podría resaltar sabores y texturas principalmente (Ruiz-Armenta y col 2018). De igual manera, la PO no presentó diferencia significativa (LSD,  $p \leq 0.05$ ) con respecto a la PCA en los valores de aceptabilidad general.



**Figura 24.** Análisis de frecuencia de la probabilidad de compra (1= si, 2= probablemente si, 3= tal vez, 4= probablemente no, 5= no) en el estudio sensorial de pastas alimenticias (PO= pasta obtenida de las condiciones óptimas de procesamiento a base de arroz quebrado y nopal; PC= pasta control a base de arroz quebrado; PCA= pasta comercial de arroz).

## IX. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos de la caracterización de las materias primas indicaron que estas presentaron características apropiadas para ser utilizadas en la elaboración de pastas alimenticias libres de gluten.
2. Los factores independientes contenido de humedad (H) y contenido de harina de nopal (CN) fueron los que presentaron mayor efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre las diferentes características físicas y fisicoquímicas.
3. Las pastas alimenticias obtenidas presentaron parámetros de cocción (tiempo de cocción (TC), aumento de volumen (AV), aumento de peso (AP) y pérdidas de sólidos por cocción (PSC)), similares a productos comerciales.
4. El factor independiente harina de nopal (HN) fue el que presentó mayor efecto sobre las características fitoquímicas, antioxidantes y biológicas (clorofilas totales, compuestos fenólicos (libres, ligados y totales) y actividad antioxidante (ABTS, DPPH, Deoxi-D-Ribosa) y biológica (Inhibición de oxidación LDL).
5. Mediante el método numérico se obtuvieron las condiciones óptimas de procesamiento (TE= 118.0 °C, H= 31.7%, y CN= 18.0%), los valores experimentales obtenidos en la validación fueron similares a los valores predichos por los modelos.
6. Los análisis nutrimentales sugieren que las pastas obtenidas en las condiciones óptimas de procesamiento presentaron valores superiores en el caso de fibra dietaria, digestibilidad proteínica *in vitro*, perfil de aminoácidos esenciales y perfil de minerales, esto debido a las materias primas utilizadas y a las modificaciones causadas por el proceso de extrusión, las cuales favorecieron el incremento de algunas de estas propiedades.

7. Se obtuvieron pastas alimenticias, con características físicas, fisicoquímicas y propiedades de cocción similares a productos comerciales, con la ventaja de presentar mejor contenido de compuestos bioactivos, debido al importante aporte de compuestos fenólicos presentado por la harina de nopal. Así mismo, el consumo de estos productos pudiera tener eventualmente efectos positivos 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.
- Adebiyi J, Obadina A, Mulaba-Bafubiandi O, Adebo E. 2016. Effect of fermentation and malting on the microstructure and selected physicochemical properties of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour and biscuit. *Journal of Cereal Science*, 132-136.
- Adom KF, Liu RH. 2002. Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:6182-6187. <https://doi.org/10.1021/jf0205099>
- Ahmad A, Davies J, Randall S, Skinner G. 1996. Antiviral properties of extract of *Opuntia streptacantha*. *Antiviral Research*, 30: 75-85.
- Ahmed I, Qazi IM, Jamal S. 2016. Assessment of proximate compositions and functional properties of blends of broken rice and wheat flours. *Sarhad Journal of Agriculture*, 32(3), 142-150.
- Aguilar C, Rodríguez H, Saucedo P, Jasso C. 2008. Fitoquímicos Sobresalientes del Semidesierto Mexicano: de la planta a los químicos naturales y a la biotecnología. Saltillo, Coahuila, México: Path Design.
- AgroSíntesis. 30 de octubre de 2023. *AgroSíntesis*. Obtenido de <http://www.agrosintesis.com/la-produccion-consumo-arroz-mexico/#.XNUXfY5KjIV>

- Alarcón-Domene R, Rivera-Padilla J, Ochoa-Guerra O, Rodríguez M. 2003. Auxiliares de Servicios Generales, Ministerio de Defensa. Programa I: Cocina. Primera edición ed. Madrid: MAD.
- Albuja-Vaca D, Yépez C, Vernaza M, Navarrete D. 2020. Gluten-free pasta: development of a new formulation based on rice and lupine bean flour (*Lupinus mutabilis*) using a mixture-process design. *Food Science and Technology*, 40 (2): 408-414. <http://dx.doi.org/10.1590/fst.02319>.
- Aldaco-Luna F, Fuentes-Lara L, Benavides-Mendoza A, Aguilera-Carbo A. 2010. Evaluación fisicoquímica de dos variedades de arroz blanco (*Oriza sativa* L.) y morado (*Oriza sativa violacea*) para determinar cualidades nutricionales. Tesis de Licenciatura, Ingeniería en Ciencia y Tecnología de Alimentos. División de Ciencia Animal. Universidad Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Almeida-Alvarado SL, Aguilar-López T, Hervet-Hernández D. 2014. La fibra y sus beneficios a la salud. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 27 (1): 73-76.
- Almeraya-Sánchez M, Navarrete-López A. 2021. Estudio teórico de las propiedades antioxidantes del ácido ferúlico a través del mecanismo de formación de aductos con el radical  $\bullet\text{OH}$ . *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 7(7) 501.
- Alvarez-Parrilla E, De la Rosa L, Amarowics R, Shahidi F. 2012. Antioxidant activity of fresh processed jalapeño and serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (1): 163-173.
- AMEXIGAPA. Asociación Mexicana de Galletas y Pasta. 2011. Obtenido de: <http://amexigapa.org/>. Consultado el 28 de noviembre de 2023.

- Anaya-Pérez M. 2001. History of the use of Opuntia as forage in Mexico. *FAO. Plant Production and Protection Paper*, 169: 5-12.
- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL. 19th ed. Association of Official Analytical Chemists the Association. Gaithersburg, Maryland, USA.
- Astaiza M, Ruiz L, Elizalde A. 2010. Elaboración de pastas alimenticias enriquecidas con harina de quinua (*Chenopodium quinoa*) y zanahoria (*Daucus carota*). *Revista de Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial* 8:43-53.
- Avello M, Suwalsky M. 2006. Radicales libres, antioxidantes naturales y mecanismos de protección. *Atenea*, 494: 161-172.
- Balandran-Quintana RR, Barbosa-Canovas GV, Zazueta-Morales JJ, Anzaldúa-Morales A, Quintero-Ramos A. 1998. Functional and nutritional properties of extruded whole pinto bean meal (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Science* 63(1):113-116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb15688.x>
- Barber T, Kabisch S, Pfeiffer A, Weickert M. 2020. The health benefits of dietary fiber. *Nutrients*, 12: 3209.
- Bastos G, Junior M, Caliaro M, de Araujo-Pereira A, Morais C, Campos M. 2016. Physical and sensory quality of gluten-free spaghetti processed from amaranth flour and potato pulp. *LWT-Food Science and Technology*, 65: 128-136.
- Bhattacharya M, Hanna M. 1987. Influence of process and product variables on extrusion energy and pressure requirements. *Journal of Food Engineering*, 6(2):153-163.

- Bensadón S, Hervert-Hernández D, Sáyago-Ayerdi S, Goñi I. 2010. By-Products of *Opuntia ficus-indica* as a Source of Antioxidant Dietary Fiber. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65: 210-216.
- Blandón-Montoya S. 2019. Desarrollo y formulación de pasta libre de gluten. *Tesis de Licenciatura. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Ingeniera en Agroindustria Alimentaria.*
- Brennan CS, Kuri V, Tudorica CM. 2004. Inulin-enriched pasta: Effects on textural properties and starch degradation. *Food Chemistry* 86: 189–193.
- Bressi GB. 2017. *Aspectos tecnológicos y nutricionales de pasta sin gluten a base de harina de garbanzo y harina de chufa.* [Tesis de Maestría]. Universitat Politècnica De València. Valencia, España.
- Bousla A, Wójtowicz A. 2021. Gluten-Free Rice Instant Pasta: Effect of Extrusion-Cooking Parameters on Selected Quality Attributes and Microstructure. *Processes*, 9 (4): 693. <http://dx.doi: 10.3390/pr9040693>.
- Bouasla A, Wojtowicz A. 2019. Rice-Buckwheat Gluten-Free Pasta: Effect of Processing Parameters on Quality Characteristics and Optimization of Extrusion-Cooking Process. *Foods*, 8 (10): 496.
- Cabrera-Chávez F, de la Barca A, Islas-Rubio A. 2012. Molecular rearrangements in extrusion processes for the production of amaranth-enriched, gluten-free rice pasta. *LWT Food Science and Technology*, 47: 421-426.
- Carvajal-Alvarado LF. 2021. Pastas alimenticias libres de gluten a base de arroz, una revisión. *Investigación Joven*, 8 (1): 1-6.

- Chen P, Kuo W, Chiang C, Chiou H, Hsieh Y, Chu S. 2006. Black rice anthocyanin inhibits cancer cell invasion via repression of MMPs and uPA expressions. *Chemico-Biological Interactions*, 163: 218-229.
- Camelo-Méndez G, Flores-Silva P, Agama-Acevedo E, Tovar J, Bello-Pérez L. 2018. Starch and antioxidant compound release during in vitro gastrointestinal digestion of gluten-free pasta. *Food Chemistry*, 263: 201-207.
- Cervini M, Gabrielli M, Spigno G, Giuberti G. 2023. Characterization of Durum-Wheat Pasta Containing Resistant Starch from Debranched Waxy Rice Starch. *Foods*, 12: 327. [http://dx.doi: 10.3390/foods12020327](http://dx.doi.org/10.3390/foods12020327).
- Chillo S, Laverse J, Falcone PM, Protopapa A, Del Nobile MA. 2008. Influence of the addition of buckwheat flour and durum wheat bran on spaghetti quality. *Journal of Cereal Science* 47 (1): 144–152.
- Codex Alimentarius, O. d. 2008. CODEX STAN 118-1979. En C. Alimentarius. FAO/OMS.
- Cota-Gastelúm A, Salazar-García M, Espinoza-López A, Pérez-Pérez L, Cinco-Moroyoqui F, Martínez-Cruz O, Del-Toro-Sánchez C. 2019. Characterization of pasta with the addition of cicer arietinum and salvia hispanica flours on quality and antioxidant parameters. *Italian Journal of Food Science*, 31 (3).
- Criollo-Feijoo J, Martínez-Mora E, Silverio-Caldero C, Díaz-Torres R. 2017. Cooking test of food pasta prepared with wheat flour - banana starch -. *Revista Cumbres*, 3 (2): 9-16.
- Daou C, Zhang H. 2012. Study on Functional Properties of Physically Modified Dietary Fibers Derived from Defatted Rice Bran. *Journal of Agricultural Science*, 4 (9).

- Degoricija V, Klobučar I, Potočnjak I, Dokoza Terešak S, Vidović L, Pregartner G, Frank S. 2022. Cholesterol Content of Very-Low-Density Lipoproteins Is Associated with 1-Year Mortality in Acute Heart Failure Patients. *Biomolecules*, 12, 1542.
- Delgado-Nieblas C, Aguilar-Palazuelos E, Gallegos-Infante J, Rocha-Guzmán N, Zazueta-Morales J, Caro-Corrales J. 2012. Characterization and Optimization of Extrusion Cooking for the Manufacture of Third-Generation Snack Winter Squash (*Curcubita moschata* D.) Flour. *Cereal Chemistry*, 89 (1): 65-72.
- Delgado-Nieblas C, Zazueta-Morales J, Jacobo-Valenzuela N, Carrillo-López A, Aguilar-Palazuelos E, Camacho-Hernández I, Quintero-Ramos A. 2017. Production of winter squash flours rich in bioactive compounds and high water absorption by means of a precooking-air-drying optimized process. *Journal of Food Processing and Preservation*, <http://dx.doi:10.1111/jfpp.12809>.
- Del Nobile M, Baiano A, Conte A, Mocci G. 2005. Influence of protein content on spaghetti cooking quality. *Journal of Cereal Science*, 41 (3): 347-356. [http://dx.doi: 10.1016/j.jcs.2004.12.003](http://dx.doi:10.1016/j.jcs.2004.12.003).
- Della-Valle G, Kozłowski A, Colonna P, Tayeb J. 1989. *Starch transformation estimated by the energy-balance on a twin screw extruder*. *Lobensm Wiss Technology*: 22: 279-286.
- Dello Russo M, Spagnuolo C, Moccia S, Angelino D, Pellegrini N, Martini D. 2021. Nutritional Quality of Pasta Sold on the Italian Market: The Food Labelling of Italian Products (FLIP) Study. *Nutrients*, 13 (1): 171. [http://dx.doi: 10.3390/nu13010171](http://dx.doi:10.3390/nu13010171).

- Desrumaux A, Bouvier JM, Burri J. 1998. Corn grits particle size and distribution effects on the characteristics of expanded extrudates. *Journal of Food Science*, 63(5),857-863.
- Dhankar J, Vashistha N, Sharma A. 2019. Development of biscuits by partial substitution of refined wheat flour with chickpea flour and date powder. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 8 (4): 1093-1097.
- Dogan E, Gokmen V. 2017. Antioxidants bound to an insoluble food matrix: Their analysis, regeneration behavior, and physiological importance. *Food Science and Food Safety*, 16: 382-399.
- Dreher D, Junod A. 1996. Role of oxygen free radicals in cancer development. *European Journal of Cancer*, 32 (1): 30.
- Dussan-Sarria S, De la Cruz-Noguera R, Godoy S. 2019. Estudio del Perfil de Aminoácidos y Análisis Proximal de Pastas Secas Extruidas a Base de Harina de Quinoa y Harina de Chontaduro. *Información Tecnológica*, 30 (6): 93-100.
- Du-Toit M, With M, Fouché J, Taljaard S. 2019. Mucilage powder from cactus pears as functional ingredient: influence of cultivar and harvest month on the physicochemical and technological properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56: 2404-2416. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03706-9>
- Ek P, Kowalski R, Ganjyal G. 2020. Raw material behaviors in extrusion processing (Carbohydrates). In *Extrusion Cooking*. Amsterdam: Elsevier.
- El-Mosfata K, Kharrassi Y, Badreddine A, Andreatti P, Vamecq J, Kebbaj M, Cherkaoui-Malk M. 2014. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of

- bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19: 14879-14901.
- Escutia-López K. 2020. Efecto de la capacidad antioxidante y antiglicación in vitro del extracto acuoso de Stevia rebaudiana. *Revista bio ciencias*, 7 e85.
- Espinoza-Moreno R, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J, López-Valenzuela J, Paredes-López O, Gutiérrez-Dorado R. 2016. Healthy ready to eat expanded snack with high nutritional and antioxidant value produced from whole amarantin transgenic maize and black common bean. *Plants Foods for Human Nutrition*, 71: 218-224.
- Espiru-Ramírez M, Rivera-Suazo Y, Valencia-Mayoral P. 2021. Seronegative celiac disease: to find it, you have to look for it. A pediatric case report. *Revista de Gastroenterología de México*, 86 (3): 317-319. <http://DOI.10.1016/j.rgmx.2020.08.003>.
- Faheid S, Rizk I, Kishk Y, Ragab G, Mosfata S. 2022. Carboxymethyl cellulose and psyllium husk in gluten-free pasta. *Food and Raw Materials*, 10 (2): <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-540>.
- 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. 2013. Report on dietary protein quality evaluation in human nutrition, paper no. 92: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO.
- FAO. 2014a. Desórdenes de malnutrición . *FAO. Malnutrición proteico energetica* , Capítulo 12.
- FAO. 2014b. Seguimiento del mercado del arroz . *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*, 1 (17): 1-10.

- FAO. 2023. Seguimiento del mercado del arroz . *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*, 1 (21): 1-10.
- Fares C, Platani C, Baiano A, Menga V. 2010. Effect of processing and cooking on phenolic acid profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta enriched with debranning fractions of wheat. *Food Chemistry* 119: 1023–1029.
- Fasano A, Bertil I, Geraduzzi T, Drago S, Green PH, Waserman S. 2013. Prevalence of celiac disease in at-risk and not-at-risk groups in the United States: a large multicenter study. *National Library of Medicine*, 163(3):286-92.
- Fellows P. 2000. *Food Processing Technology: Principles and practice*. Woodhead: USA.
- Fenton H. 1894. Oxidation of tartaric acid in presence of iron. *Journal of the Chemical Society Transactions*, 65: 899-910.
- Ference B, Ginsberg H, Graham I, Ray KK. 2017. Low-density lipoproteins cause atherosclerotic cardiovascular disease. 1. Evidence from genetic, epidemiologic, and clinical studies. A consensus statement from the European Atherosclerosis Society Consensus Panel. *European Heart Journal*, 38 (32): 2459-2472.
- Fernandes A, Noraga G, Menezes C, Cichoski A, Mercadante A, Jacob-Lopes E, Zepka L. 2017. Identification of chlorophyll molecules with peroxy radical scavenger capacity in microalgae *Phormidium autumnale* using ultrasound-assisted extraction. *Food Research International* , 99 (3): 1036-1041.
- Ferreira-Corona L, Calderon-De la Barca AM, Ortega-Velez MI, Sotelo-Cruz, N. 2012. Seguimiento del estado nutricional de niños celíacos en dieta sin gluten. *Tesis de*

*Maestría. Maestría en Ciencias. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.*

Feugang J, Ye F, Zhang D, Yu Y, Zhong M, Zou C. 2010. Cactus pear extracts induce reactive oxygen species production and apoptosis in ovarian cancer cells. *Nutrition and Cancer* , 62: 692-699.

Fiorda F, Soares M, Da Silva F, Grosmann M, Souto L. 2013. Microestructure, texture and colour of gluten-free pasta made with amaranth flour, cassava starch and cassava bagasse. *Food Science and Technology*, 54: 132-138.

Gallegos-Infante J, Rocha-Guzmán N, González-Laredo R, Reynoso-Camacho R, Medina-Torres L, Cervantes-Cardozo V. 2009. Effect of air flow rate on the polyphenols content and antioxidant capacity of convective dried cactus pear cladodes (*Opuntia ficus indica*). *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60: 80-87.

García-Novo M, Serrano-Vela J, Esteban-Luna B. 2014. Protocolo de diagnóstico y seguimiento de la Enfermedad Celíaca desde Atención primaria. *Asociación de Celíacos y Sensibles al Gluten de la Comunidad de Madrid*, 1-20.

Genova M, Ventura B, Giuliano G, Bovina C, Formiggini G, Parenti-Castelli G, Lenaz G. 2001. The site of production of superoxide radical in mitochondrial Complex I is not a bound ubiquinone but presumably iron-sulfur cluster N2. . *FEBS Letters*, 505 (3): 364.

Giacco R, Vitale M, Riccardi G. 2016. Pasta: Role in Diet. *Elsevier. Encyclopedia of Food and Health*, 242-245.

- Gil-Hernández A. 2010. *Tratado de Nutrición: Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos*. Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Giménez MA, Basett N, Lobo M, Sammán N. 2013. Fideos libres de gluten elaborados con harinas no tradicionales: características nutricionales y sensoriales. *Composición de Alimentos*, 31(144):19-23.
- González R, Torres R, De Greef D. 2002. Extrusión-Cocción de Cereales. *Boletín de la Sociedad Brasileña de Ciencia y Tecnología de Alimentos* 36:83-136.
- Goñi I, Valentin-Gamazo C. 2003. Chickpea flour ingredient slows glycaemic 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, Torres, A, Guerra M. 2003. Desarrollo y evaluación de una pasta a base de trigo, maíz, yuca y frijol. *Interciencia*, 28 (7): 372-379.
- Granito M, Ascanio V. 2009. Desarrollo y transferencia tecnológica de pastas funcionales extendidas con leguminosas. *Venezuela: Archivos latinoamericanos de Nutrición*, 71-77.
- Granito M, Pérez S, Valero Y. 2014. Quality of cooking, acceptability and glycaemic index of enriched pasta with legumes. *Revista Chilena de Nutrición*, 41 (4): 425-232.
- Gull A, Prasad K, Kumar P. 2015. Effect of millet flours and carrot pomace on cooking qualities, color and texture of developed pasta. *LWT- Food Science and Technology*, 63 (1): 470-474. <http://dx.doi: 10.1016/j.lwt.2015.03.008>.

- Guevara-Figueroa T, Jimenez-Islas H, Reyes-Escogido M, Mortensen A, Laursen B, Lin L, Barba-De la Rosa A. 2010. Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia*). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23: 525-532.
- Haapalahti M, Kulmala P, Karttunen T, Paajanen L, Laurila K. 2015. Nutritional status in adolescents and young with screen-detected celiac disease. *Journal Pediatric of Gastroenterology Nutrition*, 5: 566-570.
- Heimler D, Vignolini P, Dini MG, Vincieri FF, Romani A. 2006. Antiradical activity and polyphenol composition of local Brassicaceae edible varieties. *Food Chemistry* 99(3):464-469. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.057>
- Herken E, Ibanoglu S, Oner M, Ibanoglu E. 2006. The in vitro protein digestibility, microbiological quality and gelatinization behaviour of macaroni as affected by cowpea flour addition. *Food Chemistry*, 98: 664-669. <http://dx.doi:10.1016/j.foodchem.2005.06.042>.
- Hernández-Aguirre MA; Osorio-Díaz P; Rodríguez-Ambriz SL. 2013. *Efecto del proceso en la calidad y digestibilidad de pasta sin gluten*. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos.: Centro de Desarrollo de Productos Bióticos. Instituto Politecnico Nacional.
- Hernández-Becerra E, Aguilera-Berrero M, Contreras-Padilla M, Pérez-Torrero E, Rodríguez-García M. 2022. Nopal cladodes (*Opuntia Ficus Indica*): Nutritional properties and functional potential. *Journal of Functional Foods*, 95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2022.105183>.

- Hernández-Medina M, Torruco-Uco J, Chel-Guerrero L, Betancur-Ancona D. 2008. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology*, 28 (3): 718-726. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>.
- Herrera-Cazares L, Luzardo-Ocampo I, Ramirez A, Gutiérrez-Urbe J. 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 (1). <http://dx.doi:10.1016/j.foodres.2021.110591>.
- Hill D, Dirks M, Liptak G, Colleti R, Frasano A, Guandali S. 2005. Guideline for the diagnosis and treatment of celiac disease in children: recommendations of the North American Society for Pediatric Gastroenterology, Hepatology and Nutrition. *Journal of pediatric gastroenterology and nutrition*, 40: 1-19.
- Hopman E, Cessie S, Von Blomberg B, Mearin M. 2006. Nutritional management of the gluten-free diet in young people with celiac disease in The Netherlands. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 1: 102-108.
- Hu C, Zawistowski J, Ling W, Kitss D. 2003. Black rice (*Oriza sativa* L. indica) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen and nitric oxide in chemical and biological model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 5: 5271-5277.
- Huang X, Liu H, Ma Y, Mai S, Cheng L. 2022. Effects of Extrusion on Starch Molecular Degradation, Order–Disorder Structural Transition and Digestibility-A Review. *MDPI. Foods*, 11 (2538).

- INEGI. 2007. *Características Principales del Cultivo del Nopal* . Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/agricola/nopal\\_df/CulnopDF.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/agricola/nopal_df/CulnopDF.pdf)
- Islas-Rubio A, De la Barca A, Cabrera-Chávez F, Cota-Gastélum A, Beta T. 2014. Effect of semolina replacement with a raw: popped amaranth flour blend on cooking quality and texture of pasta. . *LWT-Food Science and Technology*, 57 (1): 217-222.
- IPO. 2014. *International Pasta Organisation*. Obtenido de <http://www.internationalpasta.org/index.aspx?idsub=12171>. Consultado el 5 de mayo de 2019
- IPO. 2023. Annual Report 2022 . *International Pasta Organisation (IPO)* (1): 2-12.
- Itani T, Tatemoto H, Okamoto MF, Muto N. 2002. A comparative study on antioxidative activity and polyphenol content of colored kernel rice. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology*, 49: 540-543.
- Jadresin O, Misak Z, Sanja K, Sonicki Z, Zizic V. 2008. Compliance with gluten-free diet in children with coeliac disease. *Journal of Pediatrics Gastroenterology and Nutrition.*, 47: 344-348.
- Jahan I, Mosfata M, Hossain H, Nimmi I, Sattar A, Alim A, Moeiz S. 2010. Antioxidant activity of *Stevia rebaudiana* Bert. Leaves from Bangladesh. *Bangladesh Pharmaceutical Journal*, 13 (2): 67-75.

- Jalgaonkar K, Jha S, Nain L, Iquebal A. 2018. Quality Changes in Pearl Millet Based Pasta during Storage in Flexible Packaging. *Journal of Agricultural Engineering*, 54 (3): 22-31.
- Kamppainen T, Heikkinen M, Ristikankare M, Kosma V. 2010. Nutrient intakes during diets including unklined and large amounts of oats in celiac disease. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1: 7-23.
- Kapoerchan V, Wiesner M, Overhand M, Van der Marel G, Koning F, Overkleef, H. 2008. Desing of azidoproline containing gluten peptides to supperss CD4+T-cell responses associated with celiac disease. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 16: 2053-2062.
- 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)
- Kinsey L, Burden S, Bannerman E. 2008. A dietary survey to determine if patients with coeliac disease are meeting current healthy eating guidelines and how their diet compares to that of the British general population. *European Journal of Clinical Nutrition*, 62, 1333–1342.
- Krishnan M, Prabhasankar P.2012. Health Based Pasta: Redefining the Concept of the Next Generation Convenience Food. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52 (1): 9-20.
- Lee A, Ng D, Dave E, Ciaccio EG. 2009. The effect of substituting alternative grains on the diet on the nutritional profile of the gluten free diet. *Journal Human Nutrition and Ditetics*, 22.

- Lelag K, Barron C, Cordelle S, Schlich P, Walrand S. 2017. How the structure, nutritional and sensory attributes of pasta made from legume flour is affected by the proportion of legume protein. *Food Science and Technology*, 79: 471-478.
- Lim J. 2011. Hedonic scaling: A review of methods and theory. *Food Quality and Preference*, 22, 733-747.
- Ling W, Cheng Q, Ma J, Wang, T. 2001. Red and black rice decrease atherosclerotic plaque formation and increase antioxidant status in rabbits. *Journal of Nutrition*, 131: 1421-1426.
- Loncaire A., Kosivie I., Pilizota V. 2016. Effect of apple by-product as a supplement on antioxidant activity and quality parameters of pasta. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 6 (2): 97-103.
- López-Romero P, Pichardo-Ontiveros E, Avila-Nava A, Vázquez-Manjarrez N, Tovar A, Pedraza-Chaverria J. 2014. The Effect of Nopal (*Opuntia Ficus Indica*) on Postprandial Blood Glucose, Incretins, and Antioxidant Activity in Mexican Patients with Type 2 Diabetes after Consumption of Two Different Composition Breakfasts. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 114 (11): 1811-1818.
- Lorusso A, Verni M, Montemurro M, Coda R, Gobbetti M, Rizzello C. 2016. Use of fermented quinoa flour for pasta making and evaluation of the technological and nutritional features. *LWT-Food Science and Technology*, 78: 215-221.
- 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.

- Lue C, Driskell A, Leips J, Buffington M. 2016. Review of the genus *Leptopilina* (Hymenoptera, Cynipoidea, Figitidae, Eucoilinae) from the Eastern United States, including three newly described species. *Journal of Hymenoptera Research*, 53: 35-76.
- Lucisano M, Cappa C, Fongaro L, Mariotti M. 2012. Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: Evaluation of the cooking behaviour. *Journal of Cereal Science*, 56: 667-675.
- Marti A, Seetharaman K, Pagani M. 2010. Rice-based pasta: a comparison between conventional pasta-making and extrusion-cooking. *Journal of Cereal Science*, 52: 404-409.
- Marti A, Pagani M. 2013. What can play the role of gluten in gluten free pasta? *Trends in Food Science and Technology*, 31 (1): 63-71. <http://dx.doi:10.1016/j.tifs.2013.03.001>.
- Marti A, Pagani M, Seetharaman K. 2011. Understanding starch organization in gluten-free pasta from rice flour. *Carbohydrate Polymers*, 84: 1069-1074.
- Mastromatteo M, Conte A, Del Nobile M. 2012. Combined effect of active coating and MAP to prolong the shelf life of minimally processed kiwifruit (*Actinidia deliciosa* cv. Hayward). *Food Research International*, 44: 1224-1230.
- Mao X, Hua Y, Chen G. 2014. Amino Acid gla, Molecular weight distribution and Gel Electrophoresis of Walnut (*Junglans regia* L.) Proteins and Protein Fractionations. *International Journal of Molecular Sciences*, 15: 2003-2014.

- Mataix-Verdú J. 2005. Nutrición para educadores. Segunda edición ed. España: Díaz de Santos.
- Manthey F, Saujanya T, Dick M, Badaruddin. 2004. Extrusion properties and cooking quality of spaghetti containing buckwheat bran flour. *Cereal Chemistry*, 81: 231-236.
- Matos-Segura M, Molisa-Rosell C. 2013. Formulación y Desarrollo de Productos Horneados Libres de Gluten a Base de Harina de Arroz Enriquecidos con Proteína. Tesis Doctoral: Universidad Politecnica de Valencia. Valencia, España.
- Medina-Torres L, García-Cruz E, Caldera F, González-Laredo F, Sánchez-Olivares J, Gallegos-Infante N. 2013. Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*). *Food Science and Technology*, 50: 642-650.
- Melini V, Melini F, Acquistucci R. 2020. Phenolic Compounds and Bioaccessibility Thereof in Functional Pasta. *Antioxidants*, 9 (343): 2-30.
- Méndez-Zamora G, García-Macías J, Santellano-Estrada E, Chávez-Martínez A, Durán-Meléndez L, Silva-Vázquez R, Quintero-Ramos A. 2015. Fat reduction in the formulation of frankfurter sausages using inulin and pectin. *Food Science and Technology*, 35: 25-31. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.6417>.
- Menga V, Amato M, Phillips T, Angelino D, Morreale F, Fares C. 2016. Gluten-free pasta incorporating chia (*salvia hispanica* L.) As thickening agent: an approach

to naturally improve the nutritional profile and the in vitro carbohydrate digestibility. *Food Chemistry*, 221: 1954-1961.

Mercier C. 1993. Nutritional appraisal of extruded foods. *International Journal of Food Science and Nutrition* 60(4):545-553.

Milán-Carrillo J, Montoya-Rodríguez A, Gutiérrez-Dorado R, Perales-Sánchez JXK, Reyes-Moreno C. 2012. Optimization of extrusion process for producing high antioxidant instant amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L) flour using response surface methodology. *Applied Mathematics* 3:1516-1525.

Morales P, Cebadera L, Cámara R, Reis F, Barros L, Berrios J. 2015. Lentil flour formulations to develop new snack-type products by extrusion processing: Phytochemicals and antioxidant capacity. *Journal of Functional Foods*, 19: 537-544.

Moreiras O, Carvajal A, Cabrera L, Cuadrada C. 2013. Tablas de composición de alimentos. Guía de prácticas. España : Ediciones Pirámide.

Moscoso F, Quera R. 2016. Update on celiac disease. *Revista Medica de Chile*, 144: 211-221.

Moussaoui B, Rahali A, Hamed D, Guemou L, Riazi A. 2022. Antioxidant and cytotoxic activities of alkaloids extracted from inermis nopals of Algerian *Opuntia ficus-indica* (L). *Asian Journal of Agriculture and Biology*, (2). <http://dx.doi:10.35495/ajab.2021.05.231>.

Nascimento C, Carvalho C, Takeiti Y, Castro D, Ramírez J. 2011. Use of sesame oil cake (*Sesamum indicum* L.) on corn expanded extrudates. *Food Research International*, 45: 434-443.

- Nasehi B, Mortazavi S, Razavi M, Nasiri M, Karim R. 2009. Optimization of the extrusion conditions and formulation of spaghetti enriched with full-fat soy flour based on the cooking and color quality. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60: 205-214.
- Nazareno M. 2018. Propiedades nutricionales y medicinales de frutos y cladodios de nopal . En O. d. Agricultura, *Ecología de cultivo, manejo y usos del nopal* (págs. 171-178). Roma: Ruth Duffy.
- Nayak B, Liu R, Berrior J, Tang J, Derito C. 2014. Bioactivity of Antioxidants in Extruded Products Prepared from Purple Potato and Dry Pea Flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 8233-8243.
- Nelson M, Mendoza NN. 2007. A survey of provision of dietetic services for celiac disease in the UK. . *Journal Human Nutrition and Dietetics* , 20: 403-411.
- Núñez-López M, Paredes-López O, Reynoso-Camacho R. 2013. Functional and hypoglycemic properties of nopal cladodes (*O. ficus-indica* L.) at different maturity stages using in vitro and in vivo test. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (46): 10981-10986. <http://dx.doi:10.1021/jf403834x>.
- Oikonomou N, Krokida M. 2011. Literature data compilation of wai and wsi of extrudate food products. *International Journal of Food Properties*, 14 (1): 199-240 .
- 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>
- Oniszczyk T, Oniszczyk A, Gondek E, Guz L, Puk K, Kocira A, Wójtowicz A. 2019. Active polyphenolic compounds, nutrient contents and antioxidant capacity of

extruded fish feed containing purple coneflower (*Echinacea purpurea* (L.) Moench.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26 (1): 24-30.

Ortiz-Cruz R, Ramírez-Wong B, Sánchez-Machado D, Ledesma-Osuna A, Torres-Chávez P, Montaña-Leyva B, López-Cervantes J. 2021. Estabilidad oxidativa y contenido de compuestos fenólicos durante el almacenamiento del salvado de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) extrudido. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 24: 1-10, 2021. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.300>.

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.

Ozer E, Herken E, Guzel S, Ainsworth P, Ibanoglu S. 2006. Effect of extrusion process on the antioxidant activity and total phenolics in a nutritious snack food. *International Journal of Food Science and Technology*, 41: 289-293. <http://dx.doi:10.1111/j.1365-2621.2005.01062.x>.

Padalino L, Conte A, Lecce L, Likyova L, Sicari V, Pellicano T, Del Nobile M. 2017. Functional Pasta with Tomato By-product as a Source of Antioxidant Compounds and Dietary Fibre. *Czech Journal of Food Science*, 35 (1): 48-56.

Pagnussatt F, Spier F, Bertolin T, Costa J, Gutkoski L. 2014. Technological and nutritional assessment of dry pasta with oatmeal and the microalga *Spirulina platensis*. *Brazilian Journal of Food Technology*, 17 (4): 296-304. <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.1414>.

- Palavacino P, Ribotta P, León A, Bustos M. 2018. Gluten-free sorghum pasta: starch digestibility and antioxidant capacity compared with commercial pasta. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <http://dx.doi: 10.1002/jsfa.9310>.
- Patel P, Bajpai D, Maravi A, Shukla S. 2022. Study on Physical and Functional Characteristics of Amaranth Fortified Pasta. *Biological Forum – An International Journal*, 14(3): 1096-1104.
- Pérez-Murillo J, Zazueta-Morales J, Jacobo-Valenzuela N, Delgado-Nieblas C, Aguilar-Palazuelos E, Ruiz-Armenta X, Martínez-Bustos F. 2014. Effect of Extrusion Conditions on Cooking Properties, Texture and Rheology of Alimentary Pasta Supplemented With Raw Materials Rich in Carotenoids. *6th International Congress on Food Science, Biotechnology and Safety and Food Safety*.
- Pérez-Vizcaino F, Durarte J, Jimenez R, Santos-Buelga C, Osuna A. 2009. Antihypertensive effects of the flavonoid quercetin. *Pharmacological reports*.
- Plaza-Díaz J, Martínez-Agustin O, Gil-Hernández A. 2013. Food as sources of mono and disaccharides: biochemical and metabolic aspects. *Nutrición Hospitalaria*, 28: 5-16.
- Phongthai S, D'Amico S, Schoenlechner R, Homthawornchoo W, Rawdkuen S. 2017. Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta. *LWT- Food Science and Technology*, 17: 30145-30147.
- Polanco I. 2015. Actualización en enfermedad celíaca: diagnóstico y actuación clínica y dietética. *Nutrición Clínica en Medicina*, 2:145-156.
- Potenza M, Marasciulo F, Tiravanti E, Colantuono G, Federici A, Montagnani M. 2007. EGCG, a green tea polyphenol, improves endothelial function and insulin

sensitivity, reduces blood pressure, and protects against myocardial I/R injury in SHR. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 292: 1378-1387. <http://dx.doi: 10.1152/ajpendo.00698.2006>.

Preciado-Saldaña A, Ruiz-Canizales J, Villegas-Ochoa M, Domínguez-Avila J, González-Aguilar G. 2022. Use of by-products from the food industry. An approach to the circular economy. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23 (2): 92.

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, Alexandre A. 2012. The polyphenols, naturally occurring compounds with beneficial effects on cardiovascular disease. *Nutrición hospitalaria* , 27 (1): 76-89.<http://dx.doi: 10.3305/nh.2012.27.1.5418>.

Rachman A, Brennan M, Morton J, Torrico D, Brennan C. 2022. In-vitro digestibility, protein digestibility corrected amino acid, and sensory properties of banana-cassava gluten-free pasta with soy protein isolate and egg white protein addition. *Food Science and Human Wellness*, 12: 520-527. <http://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.054>.

Ramírez-Chicas A. 2015. Evaluación de características físicas, químicas y sensoriales de pasta Fettuccine con sustitución parcial de la harina de trigo por almidón de yuca y cáscara de huevo. *Tesis de Licenciatura. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Ingeniera en Agroindustria Alimentaria*.

- 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>
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine* 26(9-10):1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3).
- Rico D, Cano A, Martín A. 2021. Pulse-Cereal Blend Extrusion for Improving the Antioxidant Properties of a Gluten-Free Flour. *Molecules*, 26(18), 5578; <https://doi.org/10.3390/molecules26185578>.
- Ridner E, Di Sibio A. 2015. Medición del índice glucémico de 2 variedades de pastas y 2 variedades de arroz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 65 (2): 79-85.
- Rigane G, Bouaziz M, Sayadi S, Salem R. 2013. Effect of storage on refined olive oil composition: stabilization by addition of chlorophyll pigments and squalene. . *Journal of Oleo Science*, 62 (12): 981-987.
- Robin F, Dubois C, Pineau N, Labat E, Théoduloz C, Curti D. 2012. Process, structure and texture of extruded whole wheat. *Journal of Cereal Science*, 56 (2): 358-366.
- Rocha-Guzmán N, Gallegos-Infante J, Delgado-Niebas C, Zazueta-Morales J, Gonzalez-Laredo R, Cervantes-Cardoza V, Aguilar-Palazuelos E. 2012. Effect of extrusion cooking on the antioxidant activity of extruded half product snacks made of yellow corn and pumpkin flours. *International Journal of Food Engineering*, 8 (4): <http://dx.doi: 10.1515/1556-3758.2284>.

- Rochín-Medina J, Mora-Rochín S, Navarro-Cortez R, Tovar-Jímenez X, Quiñones-Reyes G, Ayala-Lujan J, Aguayo-Rojas J. 2021. Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de variedades de frijol sembradas en el estado de Zacatecas. *Acta Universitaria*, 31.
- Rodrigues-Ferreira S, Mello A, Caldas-Rosas M, Carneiro-Hecke C, Moreira-Azoubel P. 2016. Utilization of sorghum, rice, corn flours with potato starch for the preparation of gluten-free pasta. *Food Chemistry*, 191: 147-151.
- Rodríguez-Miranda J, Ramírez-Wong B, Vivar-Vera M, Solís-Soto A, Gomez-Aldapa C, Castro-Rosas J, Delgado-Licon E. 2014. Effect of bean flour concentration (phaseolus vulgaris L.), moisture content and extrusion temperature on the functional properties of aquafeeds. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13 (3): 649-663.
- Roleira F, Tavares-da-Silva E, Varela C, Costa S, Silva T, Garrido J, Borges F. 2015. Plant derived and Dietary phenolic antioxidants: Anticancer properties. *Food Chemistry*, 183: 235-258.
- Rujner J, Socha J, Syczewska M, Wojtasik A. 2014. Magnesium status in children and adolescents with coeliac disease without malabsorption symptoms,. *Journal of Clinical Nutrition*, 5: 1074-1079.
- Ruiz-Armenta X, Zazueta-Morales J, Delgado-Nieblas C, Carrillo-López A, Aguilar-Palazuelos E. 2019. Effect of the extrusion process and expansion by microwave heating on physicochemical, phytochemical, and antioxidant properties during the production of indirectly expanded snack foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43 (12): e14261.

- Ruiz-Armenta X. 2020. Caracterización fisicoquímica y potencial nutracéutico de alimentos botana extrudidos adicionados con subproductos de naranjita y maíz amarillo integral: efecto del procesamiento. *Tesis de Doctorado. Universidad Autonoma de Sinaloa. FCQB. Doctorado en Ciencia y Tecnologia de Alimentos.*
- Sabandis D, Dokastakis G. 2010. New formulations for the production of pasta (lasagna) productis enriched with chickpea flour. *Journal Science of Food Agriculture*, 63: 66-73.
- Saenz C, Corrales G, Aquino G. 2012. Nopalitos, mucilage, fiber and cochineal. En B. a. uses. Berkeley, Los Angeles: London: University of California Press.
- SAGARPA. 2023. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera* . Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/articulos/nopalitos-en-2016-se-vendieron-al-exterior-44-8-mil-toneladas>.
- Samaan J, El-Khayat G, Manthey F, Fuller M, Brennam C. 2006. Durum wheat quality. The relationship of kernel physicochemical composition to semolina quality and end product utilisation. *International Journal of Food Science and Technology*, 41: 47-55.
- Santiago-Lorenzo M, López-Jímenez A, Saucedo-Veloz C, Cortes-Flores J, Jaen-Contreras D, Soares-Espinoza J. 2016. Nutritional composition of tender cactus stems produced under mineral and organic fertilization. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 39 (4): 46-58.
- Sarawong C, Schoenlechner R, Sekiguchi K, Berghofer E, Perry K. 2014. Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic

content and antioxidant capacities of green banana flour. *Food Chemistry*, 143: 33-39.

Sereewat P, Suthipinittham C, Samathaluk S, Puttanlek C, Uttapap D, Rungsardthong V. 2015. Cooking properties and sensory acceptability of spaghetti made from rice flour and defatted soy flour. *LWT-Food Science and Technology*, 60 (2) 1: 1061-1067. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.001>.

Shih F. 2003. Review. An update on the processing of high-protein rice products . *Food Nahrung*, 47 (6): 420-424.

Shin T, Godber J, Martin D, Wells J. 1997. Hydrolytic stability and changes in E vitamers and oryzanol of extruded rice brand during storage. *Journal of Food Science*, 62: 704-708.

Sissons M, Cutillo S, Egan N, Farahnaky A, Gadaleta A. 2022. Influence of Some Spaghetti Processing Variables on Technological Attributes and the In Vitro Digestion of Starch. *Foods*, 11, 3650. <http://dx.doi.org/10.3390/foods11223650>.

Stenberg P, Roth E, Sjoberg K. 2008. Transglutaminase and the pathogenesis of coeliac disease. *European Journal of Internal Medicine* , 19: 83-91.

Stojceska V, Ainsworth P, Plunkett A. 2010. The advantages of using extrusion processing for increasing dietary fibre level in gluten free products. *Food Chemistry*, 156-164.

Sugano M, Tsuji E. 1997. Rice bran oil and cholesterol metabolism. *Journal of Nutrition*, 127: 512S-524S.

Thilakarathna H. 2013. Flavonoid bioavailability and attempts for bioavailability enhancement. *Nutrients*, 28 (5): 3367-3387.

- Thompson T, Dennis M, Higgins L, Lee A, Sharrett M. 2005. Gluten-free diet survey: are Americans with celiac disease consuming recommended amounts of fibre, iron, calcium and grain foods. *Journal Human Nutrition and Dietetics*, 18:163-169.
- Thompson T, Simpson S. 2015. A comparison of gluten levels in labeled gluten-free and certified gluten-free foods sold in the United States. *European Journal of Clinical Nutrition*, 69(2):143-146.
- Tian S, Nakamura K, Kayahara H. 2004. Analysis of phenolic compounds in white rice, brown, rice and germinated brown rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52: 4808-4813.
- Torres-Ponce RL, Morales-Corral D, Ballinas-Casarrubias M, Nevárez-Moorillón GV. 2015. El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal . *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (5): 1129-1142.
- Turco I, Bacchetti T, Morresi C, Padalino L, Forretti G. 2019. Polyphenols and glycaemic index of legume pasta. *Food & function*, doi: 10.1039/c9fo00696f.
- 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.
- Unlu E. 1998. Formation of resistant starch by a twin-screw extruder. *Cereal Chemistry*, 75: 346-350.
- Valente L, Da Paixao D, Do Nascimento A, Dos Santos P, Scheinvar L, Moura M, Da Silva J. 2010. Antiradical activity nutritional potential and flavonoids of the

- cladodes of *Opuntia monacantha* (Cactaceae). *Food Chemistry* , 123: 1127-1131.
- Vedia-Quispe V, Gurak P, Espinoza S, Ruano-Ortiz J. 2016. Calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial de tallarines producidos con sustitución parcial de sémola de trigo por harina de amaranto. . *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 20 (3): 190.
- Vem-Chan P, Rivero-Meza S, Leandro-Manfre D, Venturini C, Pedroso-Yoshida C, Schmiele S, Sinnecker P. 2022. Production of gluten-free pasta from black rice by-products: physicochemical, nutritional and sensory attributes. *Research, Society and Development*, 11 (11). <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.34057>.
- Vinces-Guillen R. 2020. Obtención de harina nixtamalizada de maíz morado (*Zea Mays* L.) por extrusión. *Tesis de Licenciatura. Universidad San Ignacio de Loyola*.
- Vitaglione PN. 2008. Cereal dietary fibre: a natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut. *Trends in Food Science and Technology*, 19 (9): 451-463.
- Walter M, Marchesan E. 2011. Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Rice. *Brazilian archives of biology and technology*, 54: 371-377.
- 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.

- Wang L, Guo J, Wang R, Shen C, Li Y, Luo X, Chen Z. Studies on quality of potato flour blends with rice flour for making extruded noodles. *Cereal Chemistry*.http: DOI 10.1094/CCHEM-05-16-0147-R.
- Wolf B. 2010. Polysaccharide-Functionality through extrusion processing. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 15: 50-54.
- Wójtowicz A, Moscicki L. 2011. Effect of Wheat Bran Addition and Screw Speed on microstructure and Textural Characteristics of Common Wheat Precooked Pasta-Like Products. *Polish Journal of Food and Nutrition sciences* 61(2):101-107.
- Yang N, Zhao M, Zhu B, Yang B, Chen C, Cui C, Jiang Y. 2008. Anti-diabetic effects of polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladode in normal and streptozotocin- induced diabetic rats. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* , 9: 570-574.
- Yawadio R, Tanimori S, Morita N. 2007. Identification of phenolic compounds isolated from pigmented rices and their aldose reductase inhibitory activities. *Food Chemistry*, 101: 1616-1625.
- Zarkadas M, Cranney A, Case S, Molloy M, Switzer C, Graham I, Burrows V. 2006. The impact of a gluten-free diet on adults with coeliac disease: results of a national survey. *Journal Human Nutrition and Dietetics* , 19:41-49.
- Zhang M, Guo B, Zhang R, Chi J, We Z, Xu Z, Tang X. 2006. Separation, purification and identification of antioxidant compositions in black rice. *Agricultural Sciences in China*, 5: 431- 440.
- Zunt H, Luder W, Harde A, Haber B, Graubaum H, Gruenwald J. 2001. Carob preparation for treatment of hypercholesterolemia. *Advanced Therapy*, 18 (1): 230-236.

## ABREVIATURAS

<b>AAE</b>	Aminoácidos esenciales
<b>AAM</b>	Actividad antimutagénica
<b>AAox</b>	Actividad antioxidante
<b>ABTS</b>	2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid)
<b>ADN</b>	Ácido desoxirribonucleico
<b>AOAC</b>	Association of Official Agricultural Chemists
<b>AP</b>	Aumento de peso
<b>ARN</b>	Ácido ribonucleico
<b>bh</b>	Base húmeda
<b>bs</b>	Base seca
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>CFT</b>	Compuestos fenólicos totales
<b>CHN</b>	Contenido de harina de nopal
<b>cm</b>	Centímetros
<b>C-PER</b>	Relación de eficiencia proteínica calculada
<b>CROH</b>	Captación de radicales hidroxilos
<b>D</b>	Digestibilidad
<b>DPIV</b>	Digestibilidad Proteínica in vitro
<b>DPPH</b>	2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl
<b>EC</b>	Enfermedad celíaca
<b>ET</b>	Equivalente de trolox
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
<b>g</b>	Gramos
<b>GAE</b>	Equivalentes de ácido gálico
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico

<b>HPLC</b>	High Performance Liquid Chromatography
<b>hr</b>	Hora
<b>HTST</b>	High Temperature/Short times
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>LDL</b>	Lipoproteínas de baja densidad
<b>m</b>	Metro
<b>Mg</b>	Magnesio
<b>min</b>	Minuto
<b>mL</b>	Mililitro
<b>MSR</b>	Metodología de superficie de respuesta
<b>N</b>	Newton
<b>NaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de sodio
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>OMS</b>	Organización mundial de la salud
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>pH</b>	Potencial de hidrogeniones
<b>PSC</b>	Pérdida de sólidos por cocción
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>SIAP</b>	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
<b>t</b>	Toneladas
<b>TACC</b>	Sin trigo, avena, centeno y cebada
<b>TBA</b>	Ácido tiobarbitúrico
<b>TC</b>	Tiempo óptimo de cocción
<b>TCA</b>	Ácido tricloroacético
<b>TE</b>	Temperatura de extrusión
<b>µg</b>	Microgramo
<b>µm</b>	Micrómetro
<b>µL</b>	Microlitro
<b>UPN</b>	Utilización proteica neta

<b>VB</b>	Valor biológico
<b>VT</b>	Velocidad de tornillo