



Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Ciencias Químico-Biológicas

Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**“Elaboración de pastas alimenticias a partir de Sake Kasu y su
potencial efecto antioxidante e hipocolesterolémico: caracterización
química, fisicoquímica, nutricional y funcional”**

Tesis

Que presenta

M en C Agustín López Díaz

Directores de tesis

Dr. Ernesto Aguilar Palazuelos

Dr. José de Jesús Zazueta Morales

Culiacán Rosales, Sinaloa, México.



Universidad Autónoma de Sinaloa

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 Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



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

El trabajo titulado: **Elaboración de pastas alimenticias a partir de Sake Kasu y su potencial efecto antioxidante e hipocolesterolémico: caracterización química, fisicoquímica, nutricional y funcional** fue realizado en el Laboratorio de Caracterización Fisicoquímica y Reológica del Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección de la Dr. Ernesto Aguilar Palazuelos y el Dr. José de Jesús Zazueta Morales y contó con la asesoría de la Dra. Gabriela López Angulo, la Dr. Carlos Iván Delgado Nieblas y el Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa. La Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) proporcionó la beca para los estudios de Doctorado del M.C. Agustín López Díaz.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
I. Resumen	1
II. INTRODUCCIÓN	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
A. Lípidos y lipoproteínas plasmáticas	3
a. Quilomicrón.....	3
b. Lipoproteína de muy baja densidad	5
c. Lipoproteína de densidad intermedia (IDL).....	6
d. Lipoproteína de baja densidad (LDL).....	7
e. Lipoproteína de alta densidad (HDL)	8
B. Enfermedades cardiovasculares	10
1. Hiperlipidemia.....	11
C. Alimentos funcionales	12
1. Compuestos bioactivos	13
D. Pastas Alimenticias.....	13
1. Composición química de las pastas alimentarias	14
2. Clasificación de las pastas	14
3. Extrusión	16
4. Materias primas para la elaboración de pastas alimenticias	18

E.	Sake.....	18
1.	Ingredientes utilizados para la elaboración de Sake	19
a.	Arroz japonico Yamada Nishiki	19
b.	Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	19
c.	Hongo <i>Koji</i> (<i>Asperguillus oryzae</i>).....	27
2.	Proceso de elaboración de sake	30
3.	Subproducto de sake (sake kasu)	32
a.	Composición química.....	32
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	34
V.	HIPÓTESIS	35
VI.	OBJETIVOS.....	36
A.	OBJETIVO GENERAL	36
B.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	36
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
A.	MATERIALES	37
1.	Materia prima	37
B.	MÉTODOS.....	37
1.	Proceso de extrusión.....	37
2.	Composición proximal	38
3.	Parámetros de color	38
4.	Índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua	39
5.	Índice de expansión	39

6.	Densidad aparente	40
7.	Tiempo óptimo de cocción.....	40
8.	Aumento de peso	41
9.	Aumento de volumen.....	41
10.	Pérdidas de sólidos por cocción	41
11.	Obtención de extractos libres y ligados	42
12.	Compuestos fenólicos totales (CFT).....	43
13.	Actividad antioxidante por el método DPPH	43
14.	Actividad antioxidante por el método ABTS	45
15.	Perfil de aminoácidos.....	45
16.	Efecto hipocolesterolémico	46
17.	Digestibilidad de proteína <i>in vitro</i>	47
18.	Relación de eficiencia proteica (C-PER).....	48
19.	Evaluación sensorial (Aceptabilidad)	49
20.	Diseño experimental	50
21.	Análisis de datos.....	50
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSION	52
A.	Caracterización química.....	52
1.	Composición proximal.....	52
2.	Perfil de aminoácidos.....	54
3.	Eficiencia proteica calculada y digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	57
4.	Fibra dietaria total, soluble e insoluble	60
B.	Estudio del proceso	63

2.	Contenido de proteína (PRO).....	63
3.	Propiedades fisicoquímicas.....	66
a.	Pérdida de sólidos por cocción (PSC)	66
b.	Amperaje	69
c.	Diferencia total de color (ΔE)	73
d.	Diámetro de la pasta.....	75
e.	Índice de expansión.....	78
f.	Densidad aparente.....	81
g.	Índice de absorción de agua.....	84
h.	Índice de solubilidad en agua	87
i.	Tiempo optimo de cocción	89
4.	Compuestos bioactivos	92
a.	Compuestos fenólicos libres (CFLib)	92
b.	Compuestos fenólicos ligados (CFLig)	97
c.	Compuestos fenólicos totales (CFT).....	99
d.	Actividad antioxidante libre por el método de ABTS	101
e.	Actividad antioxidante ligado por el método de ABTS	102
f.	Actividad antioxidante total por el método de ABTS	107
g.	Actividad antioxidante libre por el método de DPPH	109
h.	Actividad antioxidante ligado por el método de DPPH.....	114
i.	Actividad antioxidante total por el método de DPPH	118
5.	Análisis sensorial.....	122
a.	Color	122

b.	Sabor	126
c.	Textura.....	128
d.	Aceptabilidad general (AG).....	132
C.	Optimización del proceso.....	137
D.	Actividad biológica	141
2.	Efecto hipocolesterolémico.....	141
3.	Efecto hipotriglicemiante	144
4.	Efecto hipoglucémico	144
X.	CONCLUSIONES.....	146
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	148

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
1	Tipo y características de las Lipoproteínas	4
2	Composición proximal en 100g de muestra de pasta seca	15
3	Macromoléculas de pared celular de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	25
4	Clasificación taxonómica de <i>Aspergillus oryzae</i>	29
5	Composición química de la harina de arroz quebrado (HAQ), harina de sake kasu (HSK), pasta control (PC), pasta optima (PO), pasta de arroz comercial (PAC) y pasta de semolina de trigo comercial (PSTC).	53
6	Perfil de aminoácidos esenciales y no esenciales de la pasta óptima (PO), harina de arroz quebrado (HAQ) y harina de sake kasu (HSK), comparados con el patrón de referencia de la FAO (mg/g proteína).	55
7	Contenido de proteína, digestibilidad proteica y relación de eficiencia proteica (C-PER) de la harina de arroz quebrado (HAQ), harina de sake kasu (HSK) y pasta óptima (PO).	59

8	Contenido de fibra dietaria soluble, insoluble y total (%) de la harina de arroz quebrado (HAQ), harina de sake kasu (HSK) y pasta óptima (PO).	62
9	Resultados de las variables de respuesta del la optimización del proceso de extrusión: valores predichos y los valores experimentales.	139
10	Efecto de los diferentes tratamientos con pasta optimizada sobre los niveles de colesterol total, HDL, triglicéridos y glucosa en ratones Balb/c con dieta alta en grasa.	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
1	Transporte reverso de colesterol mediado por HDL, EC: ester de colesterol; FC: colesterol libre.	9
2	Representación esquemática de un extrusor de tornillo simple.	17
3	Arroz japonico pulido de la variedad Yamada Nishiki.	20
4	Micrografía de levadura de Sake.	21
5	Estructura de la pared celular de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .	23
6	Esporas del hongo <i>Aspergillus oryzae</i> .	28
7	Fermentación paralela múltiple.	31
8	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el contenido de proteína.	65
9	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la pérdida de sólidos por cocción (%).	67
10	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la velocidad de tornillo (VT) sobre la pérdida de sólidos por cocción (%).	68

11	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el amperaje (A).	70
12	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la velocidad de tornillo (VT) sobre el amperaje (A).	72
13	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el cambio de color (ΔE).	74
14	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la velocidad de tornillo (VT) sobre el cambio de color (ΔE).	76
15	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el diámetro de la pasta (mm).	77
16	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el diámetro de la pasta (mm).	79
17	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de expansión.	80
18	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de expansión.	82

19	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la densidad aparente de la pasta cruda (g/mL).	83
20	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la densidad aparente de la pasta cruda (g/mL).	85
21	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre índice de absorción en agua (IAA).	86
22	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de solubilidad en agua (ISA).	88
23	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el tiempo optimo de cocción (min)	90
24	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el tiempo optimo de cocción (min).	91
25	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos libres (mg EAG/100 g b.s.).	95

26	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos libres (mg EAG/100 g b.s.).	96
27	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos totales (mg EAG/100 g b.s.).	98
28	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos totales (mg EAG/100 g b.s.).	100
29	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS libres (mg ET/100 g b.s.).	103
30	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS ligados (mg ET/100 g b.s.).	104
31	Efecto la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS ligados (mg ET/100 g b.s.).	106
32	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS totales (mg ET/100 g b.s.).	108

33	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS totales (mg ET/100 g b.s.).	110
34	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH libre (mg ET/100 g b.s.).	112
35	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH libre (mg ET/100 g b.s.).	113
36	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH ligados (mg ET/100 g b.s.).	115
37	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH ligados (mg ET/100 g b.s.).	117
38	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH totales (mg ET/100 g b.s.).	119
39	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH totales (mg ET/100 g b.s.).	121

40	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de color.	123
41	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de color.	125
42	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de sabor.	127
43	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de sabor.	129
44	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de textura.	131
45	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de textura.	133
46	Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la aceptabilidad sensorial.	134

47	Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la aceptabilidad sensorial.	136
48	Deseabilidad de cada una de las variables de respuesta y deseabilidad general de la optimización numérica.	140

I. RESUMEN

Las enfermedades cardiovasculares representan la principal causa de muerte a nivel mundial, manifestándose clínicamente como hiperlipidemia, hiperglucemia e hipertensión. En la búsqueda de alternativas no farmacológicas, los alimentos funcionales han cobrado relevancia como estrategia preventiva. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la adición de sake kasu (subproducto de la fermentación del sake) en pastas alimenticias elaboradas por extrusión, sobre sus características químicas, fisicoquímicas, nutricionales y funcionales, así como su potencial efecto antioxidante e hipocolesterolémico. Los factores de estudio fueron el contenido de sake kasu, la temperatura y velocidad de tornillo en el extrusor. Se analizaron propiedades de cocción, color, compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante (ABTS y DPPH), perfil de aminoácidos, digestibilidad proteica y aceptabilidad sensorial. Mediante la metodología de superficie de respuesta se optimizó el proceso, encontrando condiciones óptimas de 60.83% de sake kasu, 116.89 °C y 107.93 rpm. La pasta óptima presentó 13.44% de proteína, alto contenido de compuestos fenólicos (380 mg EAG/100 g) y actividad antioxidante (7631 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$). Los estudios in vivo demostraron una reducción significativa del colesterol total, triglicéridos y glucosa en ratones con dieta alta en grasa. Estos resultados demostraron que las pastas elaboradas con sake kasu constituyen una alternativa alimentaria funcional con potencial para contribuir a la prevención de enfermedades cardiovasculares.

II. INTRODUCCIÓN

El Sake (*Nihonshu* en Japón) es una bebida alcohólica fermentada a partir de arroz, comúnmente llamado vino de arroz. Es un líquido de color dorado pajizo translucido, con cuerpo denso y alcohólico. Este producto es originario de Japón, sin embargo, su distribución y fabricación ha sido globalizado, llegando a producirse en los 5 continentes. En México, existe solo una planta productora de sake, la cual se ubica en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Dicho sake es catalogado como “sake Premium” debido a los ingredientes que son utilizados para su fabricación (Arroz pulido, agua, levadura y koji) y “Sake artesanal” debido a su método de fabricación. En el 2022 se estima una producción de 115 200 botellas aproximadamente, lo que equivale a 86 400 litros. De la fabricación del Sake se produce un subproducto llamado *Sake kasu*, el cual presenta características aprovechables como proteína, y carbohidratos, así como también compuestos bioactivos. En el 2022 se generaron alrededor de 16 toneladas de este subproducto el cual puede ser aprovechado y ser explotado para la generación de alimentos como pastas, las cuales están muy presentes en la dieta de los mexicanos, siendo la extrusión su principal método de fabricación. La extrusión es un proceso catalogado como de alta temperatura y corto tiempo. Por este motivo se ha utilizado ampliamente para la elaboración de distintos productos. Sus características permiten que los compuestos de interés no sean degradados durante el procesamiento. Debido a lo anterior, la presente investigación se centró en elaborar pastas alimentarias a partir de *Sake Kasu* ricas en compuestos bioactivos y proteína por el método de extrusión.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

A. Lípidos y lipoproteínas plasmáticas

Los lípidos plasmáticos (triglicéridos, colesterol esterificado) son moléculas no polares, escasamente solubles en agua, presentes en el torrente sanguíneo. Su transporte por el plasma es debido a que forman parte de un complejo junto a proteínas (lipoproteínas). Existen cinco clases de lipoproteínas: quilomicrones, VLDL (pre-beta-lipoproteína), IDL (lipoproteínas intermedias), LDL (beta lipoproteínas) y HDL (alfa lipoproteína) (**Cuadro 1**) (Lewis, 1983).

a. Quilomicrón

Los quilomicrones son partículas lipoproteicas de mayor tamaño y de menor densidad ($d < 1000$ g/mL). Se componen de un gran componente lipídico, enriquecido en triglicéridos y una menor proporción proteica. Estas partículas contienen diversos tipos de apolipoproteínas como: apo B-48, apo A-I, apo C-II, apo C-III y apo E. La apo B-48 es una proteína necesaria tanto para la estructura como la funcionalidad de los quilomicrones, y un marcador proteico específico.

La función principal de los quilomicrones en el organismo es de aportar a los tejidos de lípidos obtenidos de la ingesta diaria, principalmente triglicéridos. Estos, después de su hidrólisis en la luz intestinal, son absorbidos como ácidos grasos y posteriormente re esterificados de nuevo en forma de triglicéridos para ser empacados en forma de quilomicrones y posteriormente ser secretados a la linfa desde los enterocitos, y llegando a la sangre y a los tejidos que más los necesitan para su uso (tejido muscular) o almacenamiento (tejido adiposo).

Cuadro 1. Tipos y características de las Lipoproteínas.

Lipoproteínas	Densidad (g/mL)	Diámetro (nm)	TG%	CE%	CL%	FL%	Apolipoproteína	
							Principal	Otras
QM	<0.95	80-100	90-95	2-4	1	2-6	apoB48	AI, AII, AIV, AV
VLDL	0.95-1.006	30-80	50-65	8-14	4-7	12-16	apoB100	AI, CII, CIII, AV
VLDL e IDL	1.006-1.019	25-30	25-40	20-35	7-11	16-24	apoB100	CII, CIII, E
LDL	1.019-1.063	20-25	4-6	34-35	6-15	22-26	apoB100	
Lp(a)	1.006-1.125	25-30	4-8	35-46	6-9	17-24	apo(a)	B100
HDL	1.063-1.210	8-13	7	10-20	5	55	apoAI	AII, CIII, E, M

C: colesterol esterificado; CL: colesterol libre; FL: fosfolípidos; HDL: high density lipoproteins (lipoproteínas de alta densidad); IDL: intermediate density lipoproteins (lipoproteínas de densidad intermedia); LDL: low density lipoproteins (lipoproteínas de baja densidad); Lp(a): lipoproteína (a); QM: quilomicrones; TG: triglicéridos; VLDL: very low density lipoproteins (lipoproteínas de muy baja densidad); VLDLR: VLDL remnants (remanentes de VLDL).

Para la degradación de los quilomicrones es necesario el uso de una enzima llamada lipoproteína lipasa (LPL), la cual es una enzima que se encuentra anclada en los capilares de los tejidos, y que cataliza la hidrólisis de los triglicéridos de los quilomicrones liberando ácidos grasos. La LPL necesita como cofactor para ser activada la apo C-II. Esta apolipoproteína también se encuentra en otras partículas ricas en lípidos como las VLDL, las cuales experimentan un proceso de lipólisis similar. Como consecuencia de la lipólisis de los quilomicrones, estos reducen su tamaño y pasan a ser llamados quilomicrones residuales, los cuales son captados por receptores hepáticos que reconocen a apo E. La reducción de tamaño que es producido reduce fundamentalmente el núcleo e inestabilizan su estructura, provocando el desprendimiento espontáneo de porciones de su superficie. Estas vesículas discoidales que se desprenden contienen fosfolípidos, colesterol no esterificado y algunas apolipoproteínas, constituyendo uno de los orígenes de las HDL (Chapman, 2011) (Johansen, 2011).

b. Lipoproteína de muy baja densidad

Las lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), son también partículas grandes, con una densidad muy baja ($d < 1.006$ g/mL) y ricas en triglicéridos. Poseen una composición de apolipoproteínas similares a los quilomicrones, salvo en dos aspectos: no contienen apo A-I y presentan la forma completa de apo B (apo B-100), ya que el VLDL es sintetizado por el hígado y ahí no se expresa una enzima editora de apo B. El principal estímulo para la síntesis de VLDL es la captación y catabolismo de los quilomicrones residuales por parte del hígado.

El funcionamiento del VLDL es similar al de los quilomicrones, ya que se encargan del transporte de triglicéridos a los tejidos musculares y adiposos. En el proceso, estos dependen fundamentalmente de la actividad de la enzima LPL y de su cofactor apo C-II. Como consecuencia, estos disminuyen su tamaño, aumentando su densidad. Al igual que con las partículas de quilomicrones, el metabolismo de las VLDL genera la síntesis de HDL (Chapman, 2011; Johansen, 2011).

c. Lipoproteína de densidad intermedia (IDL)

Las lipoproteínas de densidad intermedia son partículas que presentan como característica una proporción relativamente pequeña de triglicéridos respecto al colesterol, teniendo una densidad que oscila de 1.019 g/mL a 1.006 g/mL. Su generación radica en la lipólisis de las VLDL.

Una parte de las partículas de IDL son capturadas a nivel hepático con ayuda de receptores que reconocen la apo E, mientras que la otra parte son convertidas en LDL mediante procesos que intervienen lipasas hepáticas (LH).

Una de las enfermedades que se puede presentar relacionada a este tipo de partículas es la disbetalipoproteinemia familiar, la cual consiste en la acumulación de IDL debida en parte a la presencia de variantes genéticas específicas de apo E (genotipo apo E2/E2), que presentan menor afinidad a los receptores apo E-específicos hepáticos (Zilversmit, 1995).

d. Lipoproteína de baja densidad (LDL)

Las lipoproteínas de baja densidad son partículas que se caracterizan por contener apo B-100 y tienen como componente mayoritario esteres de colesterol. Su densidad va de los 1.063 g/mL a 1.019 g/mL.

Estas partículas tienen como función el transporte y entrega de colesterol a las células, incluyendo el hígado y los tejidos periféricos. Son reconocidas por los receptores de LDL que se encuentran situados en la membrana plasmática, los cuales reconocen a apo B-100 y apo E. El receptor de LDL es sintetizado y enviado hacia la membrana plasmática, quedando fijado por una proteína (clatrina). Cada tiempo determinado, esté o no esté unido un LDL, estos experimentan endocitosis y son transportados al citoplasma en forma de endosomas. En caso de encontrarse un LDL, el contenido proteico y lipídico es hidrolizado hasta formar aminoácidos y colesterol no esterificado. Este tipo de colesterol es tóxico para las células en una concentración alta, siendo este el motivo por el cual debe ser utilizado para la síntesis de membranas, hormonas esteroideas, o bien, convertidos por enzimas del tipo colesterol aciltransferasa (ACAT) en ésteres de colesterol.

El adecuado funcionamiento de los receptores de LDL y su correcto funcionamiento mantiene controlada la concentración de LDL sérico. Cuando esto no sucede puede generarse enfermedades como el hipercolesterolemia familiar, la cual es una enfermedad autosómica dominante que consiste en una mutación en el gen del receptor de LDL o, con menor frecuencia, del dominio de ligando de apo B-100 o de PCSK9. Para estas enfermedades se utilizan en mayor medida medicamentos como las estatinas, las cuales inhiben la hidroximetilglutaril CoA reductasa, consiguiendo un aumento en la síntesis de receptores de LDL celular, y

por ende, reduciendo la concentración del nivel sérico de LDL y de colesterol (Goldstein, 2009; Calandra, 2011).

e. Lipoproteína de alta densidad (HDL)

Este tipo de lipoproteínas se caracteriza por poseer apo A-1, alto contenido de esteres de colesterol y su densidad varia de entre 1.2 g/mL a 1.063 g/mL. Su formación puede darse por el catabolismo de partículas ricas en triglicéridos (quilomicrones y VLDL) y por la síntesis de apo A-I, no asociado a lípidos en el hígado e intestino.

El HDL tiene como función principal el transporte reverso de colesterol (**Figura 1**) (también posee capacidad de inhibir la modificación oxidativa de las LDL, capacidad antiinflamatoria y antitrombótica). Esto depende principalmente a su contenido de apo A-I, la cual es su apolipoproteína principal, facilitando la salida de excesos de fosfolípidos y colesterol intracelular a través de mecanismos específicos que requieren de consumo energético. También, en menor grado, existe flujo de colesterol de células periféricas a través de receptores scavenger receptor B-I (SB-BI). Posteriormente el colesterol pasará a ser esterificado por la enzima lecitina colesterol aciltransferasa (LCAT). El aumento en el colesterol esterificado genera un crecimiento del HDL, hasta que su contenido sea liberado a los hepatocitos tras interactuar con SB-BI. Este colesterol puede ser eliminado por la bilis y las heces fecales, tras secreción hepática e intestinal mediada por ABCG5/ABCG8. También, el colesterol puede ser convertido a ácidos biliares, siendo estos eliminados por la vía biliar y reabsorbido a nivel intestinal.

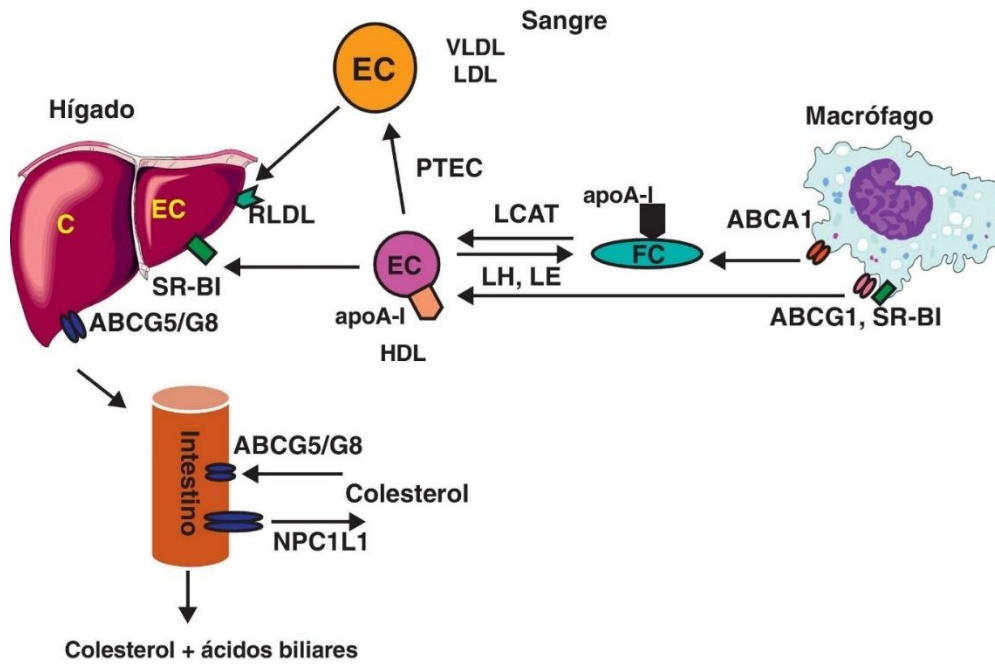


Figura 1. Transporte reverso de colesterol mediado por HDL. EC: ester de colesterol; FC: colesterol libre.

Dado que el colesterol no puede ser metabolizado por el organismo, el transporte reverso de este, junto con los ácidos biliares, es la única vía en la que se pueden eliminar del organismo. Por esto, los mecanismos hipocolesterolemiantes se centran en la inhibición de la absorción

intestinal de ácidos biliares y por ende, de colesterol (Rosenson, 2012; Fielding, 2007).

B. Enfermedades cardiovasculares

Las enfermedades cardiovasculares constituyen a un grupo de trastornos del corazón y los vasos sanguíneos, las cuales incluyen cardiopatías coronarias, enfermedades cerebrovasculares y cardiopatías reumáticas. Son la principal causa de muerte en el mundo, con un total de 17.9 millones cada año.

Los principales factores que pueden contribuir al desarrollo de este conjunto de enfermedades son la mala alimentación, inactividad física, sedentarismo, consumo de tabaco y consumo nocivo de alcohol.

La manifestación clínica de dichas enfermedades se manifiesta como hipertensión arterial, hiperglucemia, sobrepeso y obesidad, e hiperlipidemia, además de obesidad y sobrepeso.

En general, no existe algún síntoma de enfermedad subyacente de los vasos sanguíneos. Los accidentes cardiovasculares o el ataque cardíaco pueden ser el primer signo de existencia de enfermedad. Algunos síntomas en los que se pueden presentar un ataque cardíaco son: dolor o malestar en el centro de pecho y/o dolor o malestar en los brazos, el hombro izquierdo, los codos, la mandíbula o la espalda.

De igual manera, las personas pueden experimentar otros síntomas como dificultad para respirar, vómito o náuseas, mareo, desmayo, palidez y sudor frío.

1. Hiperlipidemia

La hiperlipidemia es una manifestación clínica que se presenta cuando existe demasiadas grasas (o lípidos) en el suero sanguíneo. Esta grasa incluye la presencia y elevación de los triglicéridos y el colesterol (hipocolesterolemia).

Los tratamientos que existen para la disminución del colesterol son del tipo farmacológico (estatinas, inhibidores de la absorción del colesterol, secuestradores de ácidos biliares, fibratos y derivados del ácido nicotínico) y del tipo nutricional, el cual abarca el control de peso, la actividad física y cambios en la dieta por alimentos que posean una funcionalidad (Kreisberg y Reusch 2005).

Actualmente, son distinguidos seis diferentes fenotipos de hiperlipidemia:

Tipo I: Hipertrigliceridemia, causada por aumento de quilomicrones.

Tipo IIa: Hipocolesterolemia, causada por un aumento de la lipoproteína LDL.

Tipo IIb: Caracterizado por elevados niveles de colesterol y triglicéridos, debido a un aumento contemporáneo de las lipoproteínas LDL y VLDL.

Tipo III: Aumento de los niveles de colesterol y triglicéridos, debido a la acumulación plasmática de lipoproteínas de densidad intermedia (IDL).

Tipo IV: Hipergliceridemia provocada por el aumento de la VLDL.

Tipo V: A diferencia de la hipertrigliceridemia, esta es causada por un incremento contemporáneo de los quilomicrones y las VLDL.

C. Alimentos funcionales

Los alimentos funcionales son todos aquellos que además de aportar un valor nutritivo poseen componentes biológicamente activos, los cuales aportan algún efecto añadido y beneficioso para la salud, y reducen el riesgo de contraer ciertas enfermedades (Beltrán 2016).

- Para ser un alimento funcional debe contar con las siguientes características:
- Cuenta con propiedades nutritivas y beneficiosas para el organismo.
- Disminuir y/o prevenir el riesgo de contraer enfermedades, además de mejorar el estado de salud del individuo.
- Deben poder demostrarse sus efectos beneficiosos dentro de las cantidades que normalmente se consumen en la dieta.
- Su consumo no debe ser nocivo para la salud.
- Deben presentarse en forma de alimentos de consumo cotidiano.

La relación que existe entre la salud y la alimentación ha crecido, impactando cada vez más en la innovación de alimentos, esto es ocasionado por el crecimiento de la demanda de dichos productos, y por la popularidad del concepto de alimento funcional. La población los ha tomado como un recurso importante para la prevención, manejo y tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas no transmisibles (Martirosyan 2011).

Los alimentos funcionales representan una alternativa prometedora para apoyar en el tratamiento de distintas enfermedades, ya que pueden poseer distintos efectos como disminuir el colesterol, capacidad antioxidante, potencial

antiinflamatorio, anti carcinogénico, entre otras. Algunos alimentos que se pueden considerar funcionales son bebidas, productos lácteos, pastas enriquecidas, granos germinados, cereales para desayuno, entre otros (Siro y col 2008; Gil-Chávez y col 2013).

1. Compuestos bioactivos

El motivo por el cual los alimentos funcionales son llamados de esa manera es por el hecho que poseen compuestos que presentan actividad biológica positiva para la salud humana. Estos componentes están integrados en las materias primas que se utilizan para la elaboración, o bien son maximizadas con ayuda de los procesos de elaboración de dichos alimentos (Ayala-Zavala y col 2011).

D. Pastas Alimenticias

Las pastas alimenticias son productos obtenidos por el amasado mecánico de sémola, semolina, harinas o cualquier combinación de éstas procedentes de trigos, agua y otros ingredientes opcionales permitidos, moldeados, laminados o extruidos y sometidos o no a un proceso térmico de desecación (NOM-247-SSA1-2008).

En la actualidad, se ha incrementado el consumo de alimentos funcionales debido a las expectativas del consumidor, promoviendo la generación de alimentos con mayor aporte nutrimental y que aporten al cuidado de la salud humana. Las pastas alimenticias son productos con una alta aceptabilidad a nivel mundial, debido a su versatilidad y facilidad en el momento de ser preparadas. A demás, son relativamente económicas y cuentan con una vida de anaquel relativamente larga (Tudorica y col 2002; Goñil y col 2003; Torres y col 2007; Granito y Ascanio 2009).

1. Composición química de las pastas alimentarias

Las pastas cuentan con un contenido de proteína superior al 12%, esto debido a que se encuentran fabricadas a partir de “ámbur durum”. Además, poseen carbohidratos y calorías similares al frijol, arroz o pan, ofreciendo un aporte calórico de 244 kcal por 100 g de producto y 1% de grasa **Cuadro 2** (AMEXIGAPA 2011).

En pastas, la proteína más abundante es el gluten. Ofreciendo características elásticas. Sin embargo, presenta un valor biológico bajo de proteína, debido al contenido deficiente de lisina (Granito y col 2003).

2. Clasificación de las pastas

A través del tiempo se han presentado una gran diversificación en el número de variedades y formas de pastas, por lo que su nombre puede variar con respecto a la ubicación geográfica en la que se produce y se consume (Mataix–Verdú 2005). En México se conoce tradicionalmente como pasta a la que se utiliza en la preparación de sopas, también llamada pasta seca (Rangel 2007).

Las pastas alimenticias pueden ser clasificadas de la siguiente manera: por su composición (pastas simples, compuestas y rellenas), por su forma (macarrones, espaguetis, tallarines, espirales, placas y raviolis) y por su elaboración (pastas secas, integrales, enriquecidas, rellenas y frescas).

En la industria, la tecnología usada para la elaboración de pastas es la extrusión, debido a su versatilidad.

Cuadro 2. Composición proximal en 100g de muestra de pasta seca.

Componente	Porcentaje (%)
Humedad	10.8-12.5
Carbohidratos	71.9-79.1
Proteína	10.9-13.8
Grasa	1.4-1.8

3. Extrusión

La extrusión de alimentos es un proceso en el que se fuerza un material alimenticio a fluir, en virtud de una o más variedades de condiciones de calentamiento, mezclado, y cizallamiento, a través de una boquilla que está diseñada para formar y/o expandir los ingredientes. Los extrusores (**Figura 2**) de alimentos se consideran como una técnica de altas temperaturas, tiempos cortos (HTST), y puede transformar una variedad de ingredientes en productos intermedios y finales. Durante la extrusión, la temperatura de cocción puede ser tan alta como 180-190°C, pero el tiempo de residencia es generalmente de 20 a 40 segundos (depende de los tipos de extrusores y velocidad del eje). Por esta razón el proceso de extrusión podría ser llamado como proceso HTST (Rossen y Miller 1973).

El cocimiento por extrusión, específicamente en alimentos, ha sido definido como el proceso por el cual materiales húmedos, almidonosos y/o proteicos son plastificados y cocidos en un tubo por una combinación de presión, calor y esfuerzo mecánico. La gelatinización de los componentes almidonosos y la desnaturalización de las proteínas resultan de los efectos combinados de la elevada temperatura, presión y alto esfuerzo mecánico creados en el interior del barril del extrusor (Haunk y Huber 1989).

En la actualidad existen muchas técnicas para el desarrollo de productos con características y textura apropiadas. En la industria de las pastas el proceso de extrusión a altas temperaturas y presiones por tiempos cortos es un procedimiento cada vez más popular, debido a que éste es uno de los procesos tecnológicos de mayor versatilidad para la elaboración de productos alimenticios a partir de granos de cereales y leguminosas (Hurtado y col 2001).

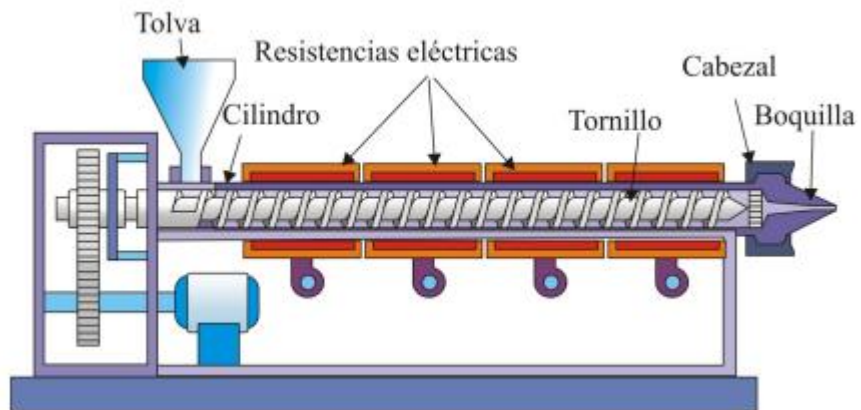


Figura 2. Representación esquemática de un extrusor de tornillo simple.

4. Materias primas para la elaboración de pastas alimenticias

Las principales materias primas en la fabricación de pastas alimenticias son la harina o sémola de trigo duro, o la mezcla de ambas y el agua. En la búsqueda de mejorar la calidad nutricional y organoléptica de las pastas se han utilizado otros ingredientes como frutos secos, y la adición de vitaminas y minerales. Una alternativa para el mejoramiento de las pastas es la adición de subproductos generados por la industria alimentaria, los cuales son considerados desperdicios, aunque actualmente se ha demostrado el buen contenido nutricional y de compuestos funcionales que presentan algunos de ellos.

En Culiacán, Sinaloa, se ha establecido la primera planta de sake de todo México, y la segunda en Latinoamérica. En la fabricación de sake se produce un subproducto llamado *Sake Kasu*, que es desechado sin ser aprovechado, siendo éste un posible ingrediente para la elaboración de productos.

E. Sake

El Sake (Nihonshu en Japón) es una bebida alcohólica fermentada a partir de arroz, comúnmente llamado vino de arroz. Es un líquido de color dorado pajizo translucido, con cuerpo denso y alcohólico, llegando a una concentración de hasta 20% de alcohol. Se utilizan solo 4 ingredientes para su fabricación: arroz, agua, levadura (*Saccharomyces cerevisiae*), koji (*Aspergillus oryzae*) (Atkinson 1881; Gauntner 2002).

1. Ingredientes utilizados para la elaboración de Sake

a. Arroz japonico Yamada Nishiki

Yamada Nishiki (**Figura 3**) es el arroz utilizado para la elaboración de sake, la cual, es una variedad japónica modificada especialmente para la elaboración de esta bebida. A diferencia del arroz común de mesa, esta variedad es de forma redonda. Dicho arroz es pulido para generar los diferentes perfiles organolépticos del sake. El pulimento se lleva a cabo por abrasión, lo que permite la reducción de la superficie del grano de arroz. Entre mayor es el pulido, mayor es el costo de la materia prima (Atkinson 1881; Gauntner 2002).

b. Levadura *Saccharomyces cerevisiae*

La *Saccharomyces cerevisiae* (**Figura 4**) es un microorganismo muy utilizado por la industria para la producción de bebidas alcohólicas y en panificación.

Es una levadura heterótrofa que metaboliza los azúcares como la fructosa y produce alcohol como subproducto (Hernández 1999; Querol 2003). Puede ser aislada de plantas, tierra, etc. Además de su función de generar alcohol, es una fuente valiosa de proteínas y vitaminas (Figueroa 1996; Solano y col 2001; Carro y col 2006). Poseen entre 40-45% de proteína, la cual es de alto valor biológico debido a que contiene una elevada cantidad de lisina, es abundante en vitaminas del complejo B (biotina, niacina, ácido pantoténico y tiamina) (Miazzo y col 2005; Aghdamshahriar y col 2006). Esta levadura es una de las especies consideradas como microorganismo GRAS, por lo que ha sido aprobada para su uso como aditivo alimentario (Boyle y col 2006; Coenen 2000).



Figura 3. Arroz japonico pulido de la variedad Yamada Nishiki.

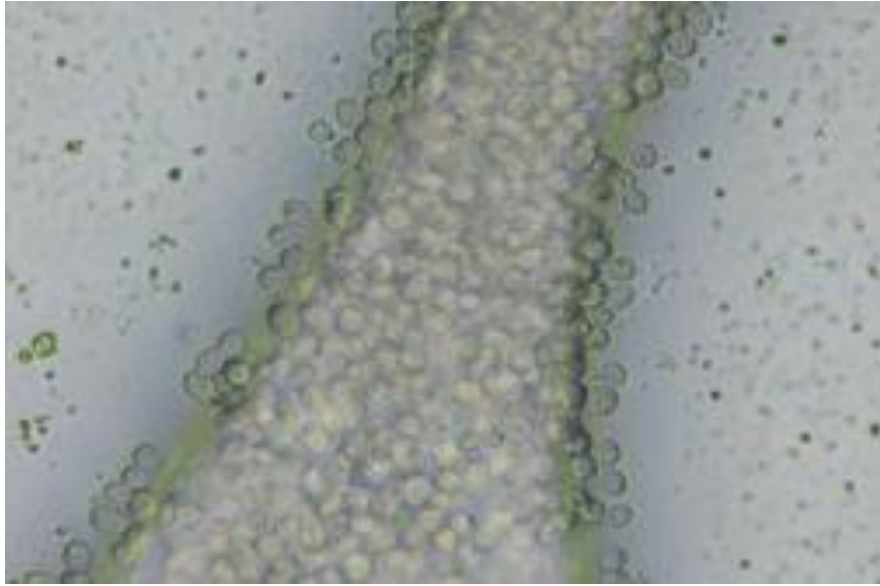


Figura 4. Micrografía de levadura de sake.

A lo largo del tiempo, se han generado diferentes productos que utilizan la levadura como materia prima, ya que contienen componentes de gran interés. Algunos de estos productos son conocidos como extractos o aislados de levaduras y paredes celulares de levadura, generados a partir de la autólisis de la célula. Dichos componentes se utilizan en la industria alimentaria como aditivos, saborizantes y fuentes de proteína (Oriol, 2004; Stone, 2006).

En el área de alimentos, principalmente animal, se ha incrementado el interés por utilizar las levaduras como fuente de polisacáridos de tipo β glucanos y manano – oligosacáridos, los cuales se ha demostrado que pueden ser utilizados como aditivos naturales capaces de aportar un beneficio a la salud (Donzis, 1996; Hooge, 2004).

Actualmente el interés para el estudio de polisacáridos de la pared celular ha crecido, debido a que ellos han demostrado tener beneficios en la salud humana (Aguilar Uscanda y Francois, 2003).

Estos polisacáridos se encuentran en la pared celular de las levaduras, formando una red tridimensional de polisacáridos y glicoproteínas (**Figura 5**), la cual cumple la función de proteger el interior de la célula. Esta estructura es altamente dinámica y adaptable al medio que la rodea, otorgando la capacidad de adaptación a cambios fisiológicos, morfológicos y de entorno. Esto garantiza la supervivencia de la célula manteniendo las condiciones osmóticas estables, brindando protección física e impidiendo que la célula sea deformada durante los procesos de crecimiento y división celular. De igual manera, la pared celular limita la salida de macromoléculas y blindo a la célula de ataques de proteínas externas (Orleans, 1997; Osumi, 1998; Klis y col, 2006).

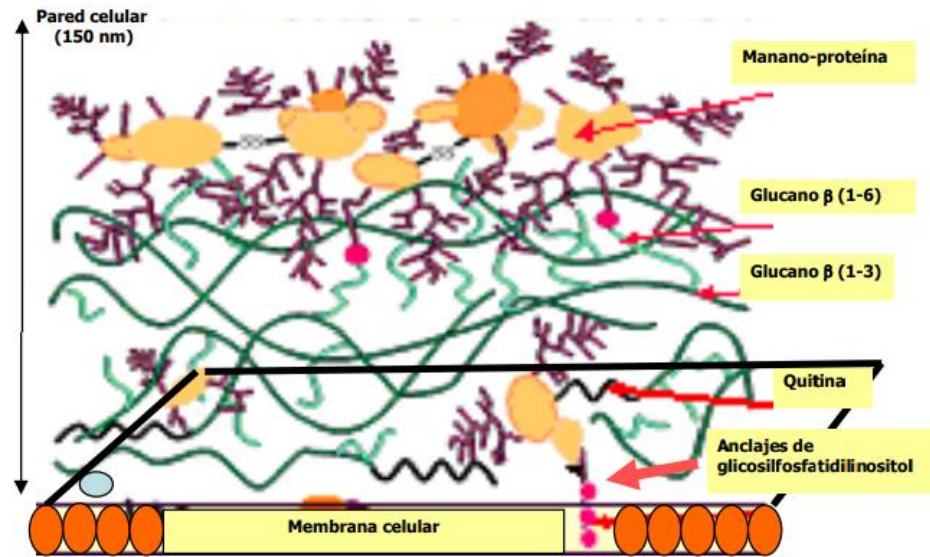


Figura 5. Estructura de la pared celular de *Saccharomyces cerevisiae*.

Diversos autores han reportado que el porcentaje de pared celular en las levaduras puede variar de 10 a 25% del total de material seco. Los investigadores atribuyen esta variación a las condiciones de crecimiento que puedan tener las células (Fleet, 1991; Klis, 1994). Si las condiciones son severas, o la levadura es sometida a cambios drásticos en los parámetros fermentativos, como respuesta a este estrés, hay un aumento de las proporciones de quitina. La composición de la pared celular, estructura tridimensional y el grosor dependen fuertemente de las condiciones medioambientales impuestas en el fermentador (Aguilar-Uscanga y col, 2003), del ciclo de vida de la célula (Klis y col, 2006) y de la cepa de origen (Oriol, 2004).

Nguyen y col en 1998 reportaron que el porcentaje de pared celular para *Saccharomyces cerevisiae* 1117 fue de $29\% \pm 1.6$, del cual 86.5% fue de polisacáridos y 13.5% de proteína.

Los polisacáridos que forman parte de la pared celular corresponden a 1,3- β -glucanos, 1,6- β -glucanos, mananoproteínas y quitina, todos ellos con grado de polimerización, tamaño o peso molecular diferentes, y concentración dentro de la pared celular (**Cuadro 3**). La parte interna de la pared celular está compuesta de 1,3- β -glucanos con pocas ramificaciones, unidos por puentes de hidrógeno, proporcionando elasticidad a la red tridimensional. Esta sirve como soporte de la capa externa, constituida principalmente por manano-proteínas, la cual se extiende hacia el exterior de la célula (Klis y col, 2006).

De forma general, las cuatro macromoléculas dentro de la pared celular se acomodan de la siguiente manera: la porción de manano-proteína se une a la molecular de 1,6- β -Glucano por medio de anclajes glicosilfosfatidilinositol, el cual

Cuadro 3. Macromoléculas de pared celular de *Saccharomyces cerevisiae*

Macromolécula ¹	% de la pared celular	Promedio del GP/kDa
Manano-Proteína²	30-50	Altamente variable
1,6-B-Glucano	5-10	24/150
1,3-B-Glucano	30-45	240/1500
Quitina	1.5-6	25/120

¹Los componentes se presentan en el orden que son encontrados en la pared de la célula, del exterior al interior.

GP = Grado de polimeización, kDa = kilodaltones

²El contenido de proteína es del 4 al 5% de la masa restante, y corresponde a las proteínas ligadas a las cadenas de carbohidratos.

contiene 5 residuos de ligandos α -manosil; a su vez, el 1,6- β -Glucano presenta ramificaciones con enlaces $\beta(1,3)$, a escala de estas ramificaciones, la quitina puede unirse a ella por medio de enlaces $\beta(1,4)$ y $\beta(1,2)$. Finalmente, la porción terminal reducida del 1,6- β -Glucano se conecta por la porción terminal no reducida de la glucosa del 1,3- β -Glucano (Kollar y col, 1995; Kollar y col, 1997).

c. Hongo Koji (*Asperguillus oryzae*)

El hongo *Asperguillus oryzae* (**Figura 6**) es un microorganismo perteneciente a la familia de los ascomicetos (**Cuadro 4**). Posee una estructura filamentosa, aislado por primera vez en 1876 por H. Ahiburg a partir de koji (arroz fermentado utilizado para la preparación de sake, miso, salsa de soja, etc.) (Barbesgaard y col 1992; Ariel 2017). Este hongo está relacionado directamente con *A. flavus*, *A. parasiticum* y *A. sojae*, con la particularidad de no producir micotoxinas, por este motivo es considerado un microorganismo GRAS (Generally Recognized as Safe) (Barbesgaard y col 1992; Ariel 2017); además de presentar ventajas como, funcionalidad a un amplio rango de temperatura (10 a 50°C), pH (2 a 11) y osmolaridad (hasta 34% en la concentración de sales); producir y secretar una alta concentración de enzimas de interés; y crecer en condiciones de actividad de agua inferiores al 0.4 (Gupta 2016; Gomi 2014).



Figura 6. Esporas del hongo *Aspergillus oryzae*.

Cuadro 4. Clasificación taxonómica de *Aspergillus oryzae*.

DOMINIO	Eukaryota
REINO	Fungi
SUBREINO	Dikarya
FILO	Ascomycota
SUBFILO	Pezizomycotina
CLASE	Eurotiomycetes
ORDEN	Eurtiales
FAMILIA	Aspergillaceae
GÉNERO	<i>Aspergillus</i>
ESPECIE	<i>A. oryzae</i>

2. Proceso de elaboración de sake

Al proceso de elaboración de Sake se le denomina fermentación paralela múltiple (**Figura 7**), ya que en el caldo de fermentación (también llamado Moromi) ocurren dos tipos de procesos simultáneos: 1) la degradación del almidón del arroz a azúcares reductores por las enzimas producidas por el *A. oryzae* y 2) la fermentación alcohólica que produce la levadura a partir de los azúcares mencionados anteriormente (Gauntner 2002). El proceso se lleva a cabo en dos etapas diferentes, shubo y moromi. El shubo o moto en japonés, es el proceso mediante el cual se reproduce o se escala la levadura. En esta etapa se colocan en contacto por primera vez todos los ingredientes (agua, arroz cocido o kake, levadura y koji). Se adiciona la levadura en condiciones ideales para que crezca y se reproduzca, con el fin de aumentar su concentración para posteriormente ser colocada en tanques de fermentación. Transcurrido el tiempo necesario, se procede a generar el caldo de fermentación conocido como Moromi. Esta es la segunda etapa que consta de tres pasos con una duración de 4 días: Soe (se agrega el shubo, agua, arroz cocido y koji), odori (día de baile, es una etapa de adaptación de la levadura a un volumen mayor), naka (se agrega agua, arroz cocido y koji) y tome (se agrega agua, arroz cocido y koji, completando el tanque de fermentación). Al concluir esta etapa, se deja fermentar alrededor de 20 días, hasta que llegue al nivel de alcohol establecido por el fabricante. Al concluir la fermentación, todo el moromi es depositado en bolsas con una porosidad específica, las cuales se colocan dentro de una prensa hidráulica. A estos se les aplica presión, teniendo como resultado Sake líquido turbio y el sólido que quedó en las bolsas denominado sake kasu.



Figura 7. Fermentación paralela múltiple.

El líquido se deja sedimentar por 7 días, se filtra, se pasteuriza y por último se embotella. El resultado es un Sake de un color dorado traslucido, con aroma frutal y cuerpo terso (Gauntner 2002).

3. Subproducto de sake (sake kasu)

El sake kasu, o torta de sake, es el subproducto generado al final de la fermentación de arroz en el proceso de elaboración de Sake, el cual representa el arroz o almidón que no fue posible convertir en azúcares y la biomasa generada a partir del crecimiento de la levadura y el hongo *A. oryzae*. Por su naturaleza, es rico en proteína de origen microbiológico, carbohidratos y bajo en contenido de lípidos. Este producto es una pasta blanca-amarilla, en algunos casos con granos detectables, olor alcohólico y sabor neutro cuando es recién obtenido. Al pasar el tiempo, el sake kasu cambia a una tonalidad café claro, y su sabor se vuelve amargo y ácido. Se ha demostrado que el sake kasu contiene un alto porcentaje de proteína (comparado con el arroz) y compuestos bioactivos, generados a partir de la fermentación alcohólica y de la producción de koji, de los cuales destaca el ácido kojico, ya que posee actividad biológica como antioxidante. En Japón, el sake kasu es utilizado en gran medida en la industria cosmética, alimentaria e industrial, por su amplia versatilidad al ser manejado. Sin embargo, en México, aún no se le ha dado el uso adecuado.

a. Composición química

Respecto a la composición química, se ha reportado un contenido de proteína de 46 a 50%, lípidos de 8 a 9% y carbohidratos de 30 a 34%. De igual forma se reporta la presencia de componentes relacionados con el azúcar como ácido kojico

(de gran importancia en la industria), galactosamina, glucosamina, manosamina y ribrosa-5-fosfato, así como, colina, betaína, ácido nicotínico y vitamina B (Izu y col 2019).

Además de los compuestos anteriores, se ha demostrado la presencia de moléculas de β -glucanos, los cuales se generan a partir de las células de levadura presentes en la fermentación. Se ha demostrado que posee actividad de atrapamiento de sales biliares, disminuyendo la cantidad de colesterol en sangre, el atrapamiento de colesterol presente en los alimentos y la inhibición del estrés oxidativo generado en el hígado (Bacha y col 2017).

Se encuentra presente en cantidades significativas el s-adenosilmetionina (SAM), la cual es generada por la levadura en la fermentación a bajas temperaturas. Esta molécula es de importancia ya que es aprovechada por el hígado para su correcto funcionamiento en el estrés oxidativo (Izu y col 2006).

El ácido kójico (5-hidroxi-2-(hidroximetil)-4-piranona) se obtuvo inicialmente de *A. oryzae* cultivado en arroz al vapor (llamado “koji” en japonés) en 1907. Actualmente es sintetizado principalmente de microorganismos como *Aspergillus flavus*, *oryzae* entre otros. Su estructura molecular está comprendida de un anillo de benceno con dos grupos hidroxilos lo que lo hace polar y ligeramente soluble en solventes orgánicos polares y agua, especialmente a temperatura ambiente. Sin embargo, el ácido kójico puro es sensible a la humedad, bastante inestable, se oxida fácilmente y se decolora, lo que reduce su calidad. Este compuesto se usa altamente en la industria cosmética, alimentaria e industrial. (Yamada y col 2014; Shakibaie y col 2018; Ishak y col 2018; Ola y col 2019; Ashooriha y col 2022).

IV. JUSTIFICACIÓN

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte a nivel mundial, manifestándose clínicamente como hipertensión, hiperglucemia, sobrepeso e hiperlipidemia. Estas enfermedades son causadas por diferentes factores como mala alimentación, inactividad física, consumo de tabaco y alcohol. Existen diferentes tratamientos farmacológicos, sin embargo, se han buscado alternativas para ayudar a curar dichas enfermedades. Uno de los tratamientos que se emplea para controlar dicha enfermedad es el consumo de alimentos funcionales. Un alimento que puede poseer características funcionales son las pastas alimenticias elaboradas a partir de subproductos industriales como el sake kasu, ya que se ha demostrado que cuenta con compuestos que poseen actividad antioxidante e hipocolesterolémica. Es por esto que la presente investigación se centró en estudiar el efecto del proceso de extrusión sobre características químicas, fisicoquímicas, nutricionales y funcionales de pastas alimenticias elaboradas a partir del subproducto sake kasu y su potencial efecto antioxidante e hipocolesterolémico.

V. HIPÓTESIS

Las pastas alimenticias extruidas elaboradas a partir de sake kasu presentan características químicas, fisicoquímicas, nutricionales y funcionales iguales o mejores que las pastas comerciales y poseen potencial efecto hipocolesterolémico.

VI. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la adición de sake kasu en pastas alimenticias sobre características químicas, fisicoquímicas, nutricionales y funcionales, elaboradas mediante el proceso de extrusión, y analizar su potencial efecto antioxidante e hipocolesterolémico.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar química (análisis proximales, fibra dietaria soluble, insoluble y total), fisicoquímicas (color, IAA, ISA), nutricionales (digestibilidad *in vitro*, perfil de aminoácidos esenciales, C-PER), y funcionales (capacidad antioxidante, compuestos fenólicos totales libres y ligados) de la materia prima.
2. Estudiar el efecto de la adición del subproducto sake kasu en la elaboración de pastas alimenticias a partir del proceso de extrusión sobre propiedades fisicoquímicas (propiedades de cocción, color, IAA, ISA), funcionales (capacidad antioxidante, compuestos fenólicos totales libres y ligados) y sensorial utilizando la metodología de superficie de respuesta.
3. Realizar un estudio de optimización del proceso de elaboración de pastas alimenticias por extrusión, utilizando la metodología de superficie de respuesta, y generar la validación y caracterización de las pastas optimizadas obtenidas adicionando sake kasu.
4. Determinar la disminución del colesterol *in vivo* del tratamiento óptimo.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

A. MATERIALES

1. Materia prima

Se utilizó arroz quebrado variedad *Yamada Nishiki* y sake kasu, los cuales fueron proporcionado por la empresa SAKECUL, la cual se encuentra en Aquiles Serdán 555 Norte, colonia centro, Culiacán Sinaloa.

B. MÉTODOS

1. Proceso de extrusión

El proceso de extrusión se llevó a cabo en un extrusor de doble tornillo (marca Shandong Light M&E LT32L, China), utilizando una matriz con dos aberturas circulares. Se utilizaron tornillos con una relación de compresión 1:1, donde se controló su velocidad.

La concentración de sake kasu en las mezclas se obtuvo a partir de estudios preliminares, donde se fijaron los niveles de los factores. Se utilizó un diseño factorial 2^{k-1} (arrojando 8 tratamientos), en el cual se eliminó el factor que menos contribución presentó a las variables de respuesta.

Durante el proceso, las temperaturas se mantuvieron constantes en la zona de alimentación (60 °C) y en la matriz de salida (75 °C), mientras que la temperatura de la zona intermedia o de cocción (TE) fue variada de acuerdo con el diseño experimental. Las muestras fueron alimentadas utilizando un alimentador cónico con tornillo sin fin y de velocidad variable. El material extrudido denominado “pasta” se cortó de manera manual en segmentos de aproximadamente 20 cm, los cuales se deshidrataron a temperatura ambiente (25 °C) por 24 h.

2. Composición proximal

Se llevó a cabo los análisis de composición proximal en las materias primas (harina de arroz quebrado, y harina de SK) que se utilizaron para la elaboración de las mezclas en los diferentes tratamientos, y en el producto óptimo. Las muestras se molieron 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. Parámetros de color

Los parámetros de color se realizaron en las mezclas sin procesar y las pastas extrudidas, utilizando un colorímetro triestímulo marca Minolta. Las muestras, fueron molidas y se cribaron utilizando un tamiz de malla 60 marca Fisherbrand. Se colocaron en una caja Petri de 5 cm de diámetro, realizándose cinco mediciones, 4 equidistantes y una en el centro, reportando el valor promedio de éstas. 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 calculó los parámetros ΔL^* , Δa^* y Δb^* , los cuales indican la diferencia de color entre las harinas sin procesar de los tratamientos y las pastas extrudidas, calculándose la diferencia total de color (ΔE) mediante la siguiente ecuación:

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

4. Índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua

Para la determinación del índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA), se utilizó la metodología 54-21 descrita por la AACC (2010), con algunas modificaciones. Consistió en calcular la cantidad de material disuelto gravimétricamente y la proporción de agua absorbida después de la agitación de una suspensión a temperatura ambiente.

Se pesó 0.25 g de muestra, la cual fue colocada en tubos para centrífuga con capacidad de 15 mL previamente pesados, posteriormente se añadió a los tubos 12 mL de agua destilada y se colocó en un agitador orbital (Vari-Mix Aliquot Mixer, Modelo M48725, Dubuque, Iowa, EUA) por 30 min. Una vez transcurridos los 30 minutos, se centrifugó la suspensión a 4000 rpm, 25 °C, por un tiempo de 30 min. El líquido sobrenadante se decantó cuidadosamente en un recipiente tarado para la determinación de sólidos. El gel formado se pesó y se calculó el IAA en base a ese peso, reportándose como gramos de agua absorbida por gramo de sólido seco.

El sobrenadante obtenido durante la determinación del IAA se colocó en un recipiente tarado y fue llevado a evaporación a 100°C por 24 h para la determinación de sólidos. El ISA se calculó con el peso de los sólidos secos recuperados por evaporación del sobrenadante de las muestras. Estas pruebas se realizaron por triplicado.

5. Índice de expansión

El índice de expansión de las pastas alimenticias se determinó dividiendo el diámetro promedio de la pasta entre el diámetro interior del dado de salida del extrusor, para lo cual se utilizó un Vernier digital (Mitutoyo Corp., modelo CD-6,

Japón) (Colonna y col 1989; Faubion y Hosene y 1982; Balandrán-Quintana y col 1998). Se realizaron 15 determinaciones por tratamiento.

6. Densidad aparente

Se calculó la densidad aparente en los productos extrudidos (pastas), los cuales fueron pesados en piezas de aproximadamente 5 cm de longitud, previamente deshidratados (25 °C, ~48 horas). Se midió su diámetro promedio y su longitud, y estos datos se utilizaron para calcular el volumen aparente (V) del producto extrudido mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{(\pi d^2 l)}{4}$$

donde, d (mm) es el diámetro promedio del producto extrudido y l (mm) es la longitud. La densidad aparente (kg/m³) fue calculada dividiendo el peso (kg) de la pieza entre su volumen aparente (Gujska y Khan 1990). Cada valor reportado es el promedio de 15 mediciones.

7. Tiempo óptimo de cocción

El tiempo optimo de cocción se define como el tiempo necesario para desaparecer la zona blanquecina, correspondiente al almidón del endospermo, que aún permanece sin gelatinizar (también denominado término “*al dente*”). Para la determinación de este tiempo, 25 g de producto (trozos de 5 cm) se sumergieron en 300 mL de agua destilada a temperatura de ebullición, transcurridos 30 s, una cinta de pasta fue sacada del recipiente de agua a temperatura de punto de ebullición (~98°C), y fue colocada en un recipiente con agua a temperatura ambiente para detener el cocimiento de la pasta. Una vez enfriada la cinta, esta se colocó en una hoja de papel de color y con ayuda de una lámina de vidrio fue presionada

suavemente, para observar el punto blanco, esta operación se repitió cada 30 s hasta obtener el punto “*al dente*”. Se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento.

8. Aumento de peso

Se utilizarón 25 g de muestra de cada uno de los tratamientos, los cuales se cortaron en trozos de 5 cm de largo y se cocinaron hasta el tiempo óptimo de cocción en 300 mL de agua destilada hirviendo ($\sim 98^{\circ}\text{C}$). Posteriormente se escurrió el agua y las pastas se sumergieron nuevamente en un volumen de 50 mL de agua a temperatura ambiente ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) por un minuto, al final del cual se dejaron escurrir y al alcanzar la temperatura ambiente se pesaron. Este parámetro fue calculado en términos porcentuales; se calculó la diferencia de peso entre las muestras antes de la cocción (pastas secas), y después de la cocción, y se dividió el resultado entre la masa inicial de las pastas. Se realizaron tres repeticiones por tratamiento.

9. Aumento de volumen

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

10. Pérdidas de sólidos por cocción

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 se pesaron y se reportaron como porcentaje de pérdidas con base al material original.

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

11. Obtención de extractos libres y ligados

Para la obtención de extractos libres y ligados se utilizó la técnica propuesta por Adom & Liu (2002) y Mora-Rochín, y col. (2010) con modificaciones. Se tomaron 0.5 g de muestra los cuales se colocaron en tubos de 50 mL y se les adicionó 10 mL de metanol acuoso al 80%. Los tubos se sonicaron durante 5 min y posteriormente se agitaron durante 10 min en un agitador orbital. Pasado el tiempo los tubos se centrifugaron a 5500 rpm a 10 °C por 10 min y se recuperó el sobrenadante. Posteriormente se llevaron a sequedad en una estufa de circulación forzada a 40°C y fueron reconstituídos en 2 mL de metanol acuoso al 80% los cuales se tomaron como extractos libres. Para obtener los extractos ligados, a los tubos con los remanentes de la muestra se les adicionó 10 mL de hidróxido de sodio al 2 M y puestos 30 min en baño maría a 90°C siendo agitados cada 5 min. Inmediatamente después se colocaron en agitación 1 h. Pasado el tiempo se agregaron 2 mL de HCl concentrado y se agitaron por 2 min. Se adicionaron 10 mL de hexano para remover la grasa de la muestra y se agitaron 2 min. Finalmente, los tubos se centrifugaron durante 10 min (4500 rpm, 10 °C) y se realizaron 4 lavados con 10 mL de acetato de etilo (agitando en vortex 2 min y centrifugando 10 min a

4500 rpm, 10 °C) por último se llevarán a sequedad para ser reconstituidos con metanol al 80% y a estos extractos se les denominaron extractos ligados.

12. Compuestos fenólicos totales (CFT)

El contenido de compuestos fenólicos totales (suma de compuestos fenólicos libres y ligados), en los extractos se determinó mediante el método colorimétrico descrito por Singleton y col. (1999). Los extractos libres y ligados se sonicaron 3 min y posteriormente fueron centrifugados 10 min a 10000 rpm a 4°C. Se preparó una solución patrón de ácido gálico a 1000 ppm (0.05 g de ácido gálico disuelto en 50 mL de etanol) a partir de la cual se realizó una curva de diluciones con etanol de 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 y 300. En una placa transparente de 96 pocillos se inyectaron 20 µl de la curva/extracto por triplicado a los cuales se les adicionó 180 µl del reactivo de Folin-Ciocalteu (1mL del reactivo de Folin-Ciocalteu en 8 mL de agua destilada) y posteriormente se les adicionó 50 µl de carbonato de sodio al 7%. La placa se incubó en obscuridad durante 90 min; transcurrido el tiempo la placa se leyó en un lector de microplacas (Synergy™ HT Multidetector, Biotek, Inc., Winooski, VT) a 750 nm. El contenido de fenólicos totales se expresó como mg equivalentes de ácido gálico (mg EAG) por 100 g de muestra, en base seca.

13. Actividad antioxidante por el método DPPH

Para llevar a cabo la determinación de la capacidad antioxidante (CAO) se utilizó la metodología de Brand-Williams y col (1995) con una modificación propuesta por Kim y col (2006) por el método de DPPH. Este compuesto es un agente oxidante de color púrpura, el cual es capaz de degradarse con la presencia de un agente antioxidante, cambiando su color a amarillo. Dicha metodología se

adaptó para llevarla a cabo en tubos de vidrio PYREX de 6 mL. Primeramente, se realizó la preparación de DPPH en metanol a una concentración de 1.95 mM, pesando de 2.4 a 3 mg de radical DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil) y después aforando a 100 mL con metanol. Posteriormente, la absorbancia de la solución del radical se ajustó a 0.76-0.78 a 515 nm en un espectrofotómetro (Modelo GENESYS 10 UV Serie 2H7G229001, USA).

Para la medición de la actividad de antioxidante se tomaron 100 µL del extracto de cada muestra empleada para el análisis de compuestos fenólicos, se le adicionó 2900 µL del radical DPPH, para posteriormente ser homogeneizados por un tiempo de 10 s en un Vortex (Thermolyne modelo MG3215, USA), y tomada la lectura de la absorbancia a 515 nm al tiempo cero. Se dejó reposar la mezcla durante media hora en la oscuridad, los tubos se agitaron durante 10 s en vortex, y finalmente se tomó la lectura correspondiente. Se utilizó como blanco metanol, y los valores de capacidad antioxidante se reportaron como µmol equivalentes de trolox (ET)/ 100 g de muestra en base seca. Para la realización de la curva de calibración se relacionó la concentración de las diferentes diluciones contra el porcentaje de inhibición. Para ello, se pesaron 0.01 g de trolox y se aforaron a 10 mL de metanol, obteniendo una solución madre con una concentración de 1000 ppm, con la cual se formaron distintas diluciones de 0.5, 10.5, 20.5, 30.5, 40.5, 50.5 µL/10 ml. Se midió la absorbancia del control, y el porcentaje de inhibición se calculó mediante la siguiente relación:

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100$$

Donde:

A0= Absorbancia del control

A= Absorbancia de la mezcla a los 30 min.

14. Actividad antioxidante por el método ABTS

La capacidad antioxidante se determinó utilizando el método de ABTS (2,2'-Azinobis (3 - etilbenzotiazolina) - 6 - ácido sulfónico) propuesto por Re y col (1999), el cual se basa en la reducción del radical $ABTS^{+\bullet}$ por los antioxidantes presentes en la muestra. Para la preparación de radical, 0.0192 g de ABTS se disolvieron en 5 mL de persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) 2.45 mM y la mezcla se dejó reposar en oscuridad durante 16 h. Una alícuota del radical $ABTS^{+\bullet}$ fue diluida en PBS hasta alcanzar una absorbancia de 700 a 735 nm. Se tomó una lectura del blanco de reactivos. En tubos de 2 mL se mezclaron 20 μ L de la muestra (extracto/curva) con 1980 μ L del radical. Se inició el conteo de 15 min de incubación a temperatura ambiente inmediatamente después de la adición del radical; transcurrido el tiempo se midió la absorbancia a 735 nm. El estándar que se utilizó es trolox (T), se preparó una disolución concentrada de 800 μ g/mL y con diluciones se construyó una curva de calibración. Los resultados fueron expresados μ mol equivalentes de trolox por 100 g de muestra en base seca (μ M ET/ 100 g b.s.). Las evaluaciones se realizaron por cuadruplicado.

15. Perfil de aminoácidos

Para la determinación del perfil de aminoácidos se empleó la metodología propuesta en la AOAC (982.30), esto para alimentos, piensos de animales y matrices biológicas. Esta metodología se divide en 3 etapas diferentes: E(a), E(b) y

E(c), descritos en el capítulo 45.3.05 de la decimoctava edición de *Official Methods of Analysis of AOAC International* (AOAC International, 2006).

Las primeras dos etapas corresponden a una hidrólisis ácida con ácido clorhídrico a 6 N por 24 h a 110 °C, con el fin de liberar la mayoría de los aminoácidos, con excepción del triptófano, la cisteína y la metionina, ya que estos se destruyen a tales condiciones. Estos fueron cuantificados por cromatografía de intercambio iónico con detector espectrofotométrico UV/Vis.

En el caso del triptófano, en el apartado E(c) se emplea una hidrólisis alcalina con hidróxido de litio a 110 °C por 16 a 24 horas, en atmosfera inerte (con gas nitrógeno). Al terminar la hidrólisis, la solución se neutralizó y el triptófano, y este reaccionó con ninhidrina y se cuantificó por cromatografía de intercambio iónico con detector espectrofotométrico UV/Vis.

16. Efecto hipocolesterolémico

El estudio se realizó con ratones hembra de la cepa BALB/c, 6 grupos de 8 ratones balb/c con 8 semanas de nacidos, en los cuales se mantuvieron en condiciones controladas de temperatura (22 ± 2 °C) y ciclos de luz/oscuridad de 12 h, con libre acceso a agua y alimento. Los grupos fueron distribuidos de la siguiente manera:

- Sanos
- Dieta alta en grasa (DAG)
- DAG + colestiramina
- DAG + pasta de Sake Kasu 50% dosis de fibra dietaria recomendada
- DAG + pasta de Sake Kasu 100% dosis de fibra dietaria recomendada

- DAG + pasta de Sake Kasu 200% dosis de fibra dietaria recomendada

La dieta alta en grasa estuvo conformada por 30% manteca de cerdo, 20% leche en polvo y 60% comida para ratón. Se alimentaron durante 14 semanas con la dieta correspondiente a cada grupo: dieta sana (control) o dieta alta en grasa (DAG) para inducir hipercolesterolemia. Transcurrido este periodo, se administró por vía oral durante 30 días el tratamiento correspondiente a cada grupo. Finalizado el tratamiento, los ratones se sometieron a un ayuno de 12 h y posteriormente se sacrificaron por dislocación cervical. La sangre total se recolectó por punción cardíaca en tubos sin anticoagulante y se centrifugó a 3000 rpm durante 15 min para obtener el suero.

Los niveles de colesterol total, HDL, triglicéridos y glucosa se determinaron utilizando un medidor portátil Mission® Cholesterol Monitoring System (ACON Diabetes Care, Estados Unidos). El sistema se basa en el método de fotometría de reflectancia de punto final y utiliza tiras reactivas desechables que contienen los reactivos enzimáticos necesarios para cada determinación. Para la medición, se aplicaron 35 µL de suero en la tira reactiva correspondiente y se introdujo en el medidor, el cual reporta los resultados en menos de 2 minutos. Los niveles de colesterol total, HDL, triglicéridos y glucosa se expresaron en mg/dL. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

17. Digestibilidad de proteína *in vitro*

La digestibilidad de proteína se determinó mediante el método enzimático de dos etapas propuesto por Tsutsui y col (1998), con ligeras modificaciones, el cual simula las condiciones del tracto gastrointestinal. La determinación se basa en la

hidrólisis secuencial de las proteínas de la muestra con pepsina en medio ácido y posteriormente con pancreatina en medio neutro. Para ello, se pesaron 500 mg de muestra (harina de arroz quebrado, harina de sake kasu o pasta óptima molida) y se homogeneizaron en 50 mL de HCl 0.1 N. La mezcla se ajustó a pH 2.0 con HCl 1 N y se añadió 1 mg de pepsina porcina (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA). La suspensión se incubó en un baño de agitación a 37 °C durante 3 h para simular la digestión gástrica. Transcurrido el tiempo, la mezcla se neutralizó a pH 7.0 con NaOH 1 N y se adicionaron 2.5 mg de pancreatina porcina (Sigma-Aldrich). La incubación continuó a 37 °C durante 4 h en un baño de agitación, simulando la digestión intestinal. La reacción enzimática se detuvo mediante la adición de ácido tricloroacético (TCA) al 10 % (v/v) en una proporción 1:1 (v/v), y el precipitado se separó por centrifugación a 5000 rpm durante 15 min. El contenido de nitrógeno en el sobrenadante (fracción soluble) se determinó por el método micro-Kjeldahl (AOAC, 2012), mientras que el nitrógeno total de la muestra sin digerir se cuantificó de la misma manera. La digestibilidad proteica in vitro se calculó como el porcentaje de nitrógeno soluble respecto al nitrógeno total de la muestra, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Digestibilidad proteica (\%)} = (\text{N soluble} / \text{N total}) \times 100$$

Los resultados se expresaron como porcentaje de digestibilidad y todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

18. Relación de eficiencia proteica (C-PER)

La relación de eficiencia proteica estimada (C-PER) se determinó a partir del perfil de aminoácidos y la digestibilidad proteica in vitro de las muestras, utilizando

la caseína como proteína de referencia. El C-PER se calculó mediante la siguiente ecuación propuesta por la FAO/WHO/UNU (1985) y utilizada por Tsutsui y col (1998):

$$C - PER = \text{Puntuación de aminoácido limitante} \frac{\text{Digestibilidad de la muestra}}{\text{Digestibilidad de la caseína}}$$

La puntuación química de cada aminoácido esencial se calculó comparando el contenido del aminoácido en la muestra (mg/g proteína) con el patrón de referencia de la FAO para adultos (FAO/WHO/UNU, 1985), identificando el aminoácido limitante como aquel con la puntuación química más baja. La digestibilidad proteica in vitro se determinó mediante el método enzimático de dos etapas (Tsutsui y col., 1998), descrito en la sección correspondiente. La caseína se utilizó como proteína de referencia, asignándole un valor de C-PER de 2.5, de acuerdo con lo reportado en la literatura (Tsutsui y col., 1998). Los valores de C-PER se calcularon para la harina de arroz quebrado (HAQ), harina de sake kasu (HSK) y pasta óptima (PO), y se expresaron como porcentaje de la eficiencia proteica de la caseína. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

19. Evaluación sensorial (Aceptabilidad)

Las pastas fueron evaluadas usando 30 panelistas no entrenados de ambos sexos, estudiantes de la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Dichos panelistas estaban familiarizados con el consumo cotidiano de pastas, plasmando sus resultados en una planilla de evaluación para cada tratamiento, donde se evaluaron los atributos: sabor, textura y aceptabilidad global, haciendo uso de una escala LAM (labeled affective magnitude). Esta es una escala bidireccional de 100 mm con una descripción verbal con rangos que van

desde -100 (máximo valor de disgusto imaginable) hasta +100 (máximo gusto imaginable), en donde cero corresponde a la opción (ni me gusta, ni me disgusta). Posteriormente, estos valores fueron transformados a una escala de 0 a 100 [0=máximo valor de disgusto imaginable; 100=máximo gusto imaginable, donde 50= ni me gusta, ni me disgusta] (Cardello y Schutz, 2004). Esta transformación se realizó para poder obtener modelos matemáticos de predicción para cada una de las respuestas de aceptabilidad. Esta prueba permitió a los panelistas manifestar su grado de aceptación por el producto. Las muestras se presentaron de forma aleatoria y fueron evaluadas con luz del día a media mañana, en diferentes días.

20. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental central compuesto rotatable de segundo orden con cinco niveles cada uno. (Box y Behnken, 1960). Los factores de estudio y sus niveles fueron elegidos mediante pruebas preliminares. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (MSR) para encontrar las condiciones óptimas de procesamiento, que proporcionen una pasta con buen contenido de compuestos bioactivos, aceptables propiedades nutrimentales y con características de calidad parecidas a las pastas comerciales.

21. Análisis de datos

Para la regresión múltiple (MSR) y predicción del comportamiento experimental de los datos se utilizaron los modelos cuadráticos y cúbicos con el programa estadístico DesignExpert (Stat-Ease, 2008) versión 7.0.

El modelo matemático fue el siguiente:

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$$

donde Y_i es la respuesta genérica, X_1 es SK, X_2 es TE, X_3 es VT y $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}$ y b_{23} son los coeficientes de regresión. Las correlaciones de Pearson se realizaron utilizando el paquete estadístico Statistica 7.0 (Statsoft, 2004), mientras que las comparaciones de medias se realizaron con la prueba LSD de Fisher, utilizando el programa estadístico Design Expert (Stat-Ease, 2008) versión 7.0.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSION

A. Caracterización química

1. Composición proximal

La composición proximal de las materias harina de arroz quebrado (HAQ) y harina de sake kasu (HSK) que fueron utilizadas para elaborar las pastas alimenticias se muestra en la **Cuadro 5**. De igual manera, se muestra la composición proximal de la pasta control (CP) que fue realizada en las condiciones óptimas de procesamiento utilizando solamente como materia prima la HAQ, la pasta optima (PO), la pasta de arroz comercial (PAC) y la pasta de sémola de trigo comercial (PSTC). En los resultados de las materias primas utilizadas para producir las pastas sin gluten se obtuvo que HSK presentó mayores valores de ceniza, proteína y grasa en relación a HAQ. Este comportamiento puede ser debido a que las levaduras presentes en la HSK concentran la proteína y los lípidos, y son utilizadas para el crecimiento de su biomasa. Los valores de cenizas en HSK fueron similares a los reportados por Ito y col. (2022) para sake kasu de origen japonés, sin embargo, los valores de proteína y grasa obtenidos en el presente estudio fueron inferiores. Esto puede ser debido a las diversas condiciones de fermentación (temperatura, tiempo de fermentación y tipo de levadura). Los valores de proteína y cenizas encontrados en el presente estudio en BRF fueron inferiores a los reportados por Castro-Montoya y col. (2024) y Delgado-Murillo y col. (2024), quienes utilizaron HAQ para producir pastas sin gluten. Este comportamiento puede deberse a la diferente variedad de granos utilizados, ya que el arroz empleado en el presente estudio fue de la variedad japónica *Yamada Nishiki*.

Cuadro 5. Composición química de la harina de arroz quebrado (HAQ), harina de sake kasu (HSK), pasta control (PC), pasta optima (PO), pasta de arroz comercial (PAC) y pasta de sémola de trigo comercial (PSTC).

	Humedad (%)	Ceniza (%)	Proteína (%)	Grasa (%)	Carbohidratos (%)
Materia Prima					
HAQ	90.71 ± 0.30	0.32 ± 0.02	06.28 ± 0.10	0.45 ± 0.01	92.95 ± 0.75
HSK	90.52 ± 0.60	0.68 ± 0.04	20.13 ± 0.04	0.95 ± 0.01	78.24 ± 0.50
Pasta					
PC	88.60 ± 0.80 ^c	0.30 ± 0.01 ^c	06.13 ± 0.13 ^c	0.42 ± 0.01 ^b	93.15 ± 0.92 ^b
PO	88.21 ± 0.14 ^c	0.78 ± 0.01 ^a	13.44 ± 0.06 ^a	0.50 ± 0.06 ^a	85.28 ± 0.72 ^d
PAC	90.92 ± 0.60 ^a	0.82 ± 0.01 ^a	03.56 ± 0.23 ^d	0.02 ± 0.01 ^d	95.60 ± 0.70 ^a
PSTC	90.02 ± 0.10 ^b	0.59 ± 0.06 ^b	10.45 ± 0.02 ^b	0.25 ± 0.01 ^c	88.71 ± 0.23 ^c

Los datos se presentan como media ± desviación estándar. Las medias con letras superíndice diferentes en una misma columna presentan diferencias significativas (prueba de LSD; $p < 0.05$).

2. Perfil de aminoácidos

El perfil de los aminoácidos es un indicador fundamental de la calidad de los alimentos en general, ya que permite conocer la capacidad de una proteína para satisfacer las necesidades o los requerimientos nutricionales del consumidor (FAO/WHO/UNU, 1985). En el presente trabajo se evaluó el perfil de aminoácidos, tanto de las materias primas (HAQ y HSK), como en la pasta optimizada obtenida por el proceso de extrusión, y los resultados fueron comparados con el patrón de referencia establecido por la FAO.

En el **Cuadro 6** se muestra el perfil de aminoácidos de la PO, donde se puede observar que la mayoría de los aminoácidos presentaron puntuaciones químicas superiores al 100%, con excepción de la lisina, la cual mostró una puntuación del 86.45%. Este resultado determina que la lisina es el aminoácido limitante en la PO, lo cual coincide con lo reportado por distintos autores para alimentos elaborados a partir de cereales como el arroz o el maíz, donde la lisina es el primer aminoácido limitante (Tsutsui y col., 1998; Juliano, 1993). Sin embargo, la puntuación de lisina en la PO (86.45%) fue superior a la reportada para la harina de arroz pulido (60.3%) por Tsutsui y col. (1998), lo cual puede ser debido a que el perfil de aminoácidos pudo ser mejorado por la adición del HSK en la mezcla. Los aminoácidos relevantes, que obtuvieron mayor puntaje químico fueron el triptófano (193.93%), isoleucina (161.10%) y valina (158.50%), lo que sugiere un exceso de estos en relación a los requerimientos de la FAO.

Cuadro 6. Perfil de aminoácidos esenciales y no esenciales de la pasta óptima (PO), harina de arroz quebrado (HAQ) y harina de sake kasu (HSK), comparados con el patrón de referencia de la FAO (mg/g proteína).

Amino Acid	PO			HAQ			HSK			FAO
	W/W%	mg/ g proteína	Puntuación Química	W/W%	mg/ g proteína	Puntuación Química	W/W%	mg/ g proteína	Puntuación Química	mg/ g proteína
Treonina*	0.50	37.7	150.80	0.19	33.2	132.80	0.73	39.2	156.80	25.0
Valina*	0.84	63.4	158.50	0.37	64.7	161.75	1.17	62.8	157.00	40.0
Metionina*	0.35	26.4	114.78	0.12	21.0	91.30	0.52	27.9	121.30	23.0
Metionina + Cisteína		49.1			42.0			51.0		0.0
Isoleucina*	0.64	48.3	161.10	0.26	45.5	151.66	0.90	48.3	161.00	30.0
Leucina*	1.13	85.3	139.83	0.48	84.0	137.70	1.59	85.3	139.84	61.0
Fenilalanina*	0.67	50.6	123.41	0.31	54.2	132.19	0.92	49.4	120.49	41.0
Fenilalanina + Tirosina		93.6			80.5			96.1		0.0
Lisina*	0.55	41.5	86.45	0.25	43.7	91.04	0.86	46.2	96.25	48.0
Histidina*	0.32	24.2	151.25	0.15	26.2	163.75	0.47	25.2	157.50	16.0
Triptófano*	0.17	12.8	193.93	0.08	13.3	201.51	0.26	14.2	215.15	6.6
Prolina**	0.62	46.8		0.25	43.7		0.87	46.7		
Glicina**	0.65	49.1		0.27	47.2		0.92	49.4		
Cisteína**	0.30	22.6		0.12	21.0		0.43	23.1		
Tirosina**	0.57	43.0		0.15	26.2		0.87	46.7		
Arginina**	0.85	64.2		0.46	80.5		1.16	62.3		

W/W%= g por cada 100 gramos de muestra.; PO: Pasta Optima.; HAQ: Harina de Arroz Quebrado.; HSK: Harina de Sake Kasu.; FAO: Food and Agriculture Organization.; *Aminoácidos esenciales.; ** Aminoácidos no esenciales.

Por otro lado, en el **Cuadro 6** se muestra el perfil de aminoácidos de la harina de arroz quebrado (HAQ), y su puntaje químico. Se puede observar que al igual que la PO, el aminoácido limitante es la lisina con un puntaje químico de 91.04 %. Los aminoácidos con mayor puntaje fueron triptófano (201.51%), histidina (163.75%) y valina (161.75%). Por su parte, la HSK presentó el mejor perfil de aminoácidos, con lisina como aminoácido limitante (96.25%) y valor específicamente alto para triptófano (215.15%), histidina (157.50%) y valina (157.0%). Esto puede ser debido a que el sake kasu es un material que se genera a partir de la fermentación del arroz, el cual contiene proteínas de origen microbiano (levadura y koji), las cuales presentan un perfil de aminoácidos más adecuado que las proteínas del arroz quebrado (Tsutsui y col., 1998; Motono y col., 2021). De los materiales, el contenido de lisina de la HSK (46.2 mg/g proteína) fue superior a la de HAQ (43.7 mg/g proteína) y al de la PO (41.5 mg/g proteína), lo que puede sugerir el aporte de este aminoácido esencial por parte del SK.

De igual manera, para los aminoácidos no esenciales se observó que la PO presentó concentraciones adecuadas de arginina (64.2 mg/g proteína), glicina (49.1 mg/g proteína) y prolina (46.8 mg/g proteína), los cuales, aunque no son esenciales, son pieza clave para diversas funciones metabólicas y estructurales en el organismo. La HSK mostró los valores más altos en la mayoría de los aminoácidos no esenciales, incluyendo tirosina (46.7 mg/g proteína) y cisteína (23.1 mg/g proteína), lo que permite evidenciar el aporte de las proteínas de los microorganismos presentes en el sake kasu (Kawakami y col., 2017).

Los resultados encontrados en el presente trabajo son similares a lo reportado por Tsutsui y col. (1998), quienes evaluaron el perfil de los aminoácidos en sake kasu, obtenido por la fermentación de arroz licuado, encontrando una puntuación química de 89.6% para la lisina (comparando con el patrón de la FAO para niños en edad preescolar). De igual manera, Motono y col. (2021) encontraron que los componentes que se mantienen después de la fermentación, contienen una alta concentración de proteína (57.4%), con perfil de aminoácidos equilibrado, lo que respalda el potencial del sake kasu como ingrediente con el potencial de aumentar la calidad proteica de los alimentos.

De igual manera, la mejora en el perfil de aminoácidos de la PO en comparación con la HAQ puede atribuirse a la adición de HSK en la formulación, así como a las condiciones de extrusión, las cuales pudieron favorecer la desnaturalización de proteínas y la liberación de aminoácidos sin degradación significativa (Moraru & Kokini, 2003). El proceso de extrusión a alta temperatura y corto tiempo (HTST) permite conservar el perfil de aminoácidos al minimizar las reacciones de degradación térmica, como la reacción de Maillard, que puede reducir la disponibilidad de lisina (Camire y col., 1997).

3. Eficiencia proteica calculada y digestibilidad proteínica *in vitro*

La calidad proteica de un alimento se encuentra determinada por el perfil de aminoácidos esenciales y su digestibilidad, lo que en conjunto da una idea de la capacidad de la proteína para ser utilizado por el organismo (FAO/WHO/UNU, 1985). Entre los indicadores para medir esta calidad se encuentran la determinación de proteína cruda, la digestibilidad proteica y la relación de eficiencia proteica (C-

PER; estimación de la capacidad de una proteína para promover el crecimiento en modelos animales) (Tsutsui y col., 1998; Motono y col., 2021).

En el **Cuadro 7** se muestran los valores de proteína, digestibilidad y C-PER para la HAQ, HSK y PO. Se observa que, para proteína, la HAQ presentó e valor más bajo con 6.28 ± 0.10 %, mientras que el valor más alto (con 20.13 ± 0.04 %) fue obtenido por la HSK. Este comportamiento puede ser debido a la naturaleza de los ingredientes. El sake kasu al ser un subproducto de la fermentación del sake, concentra la proteína del arroz en la biomasa de los microorganismos, la cual incrementa significativamente en comparación con el arroz (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). La PO fue la que presentó un contenido de proteína intermedio con 13.44 ± 0.06 %, esto debido a la combinación de ambas materias primas en la fórmula óptima.

Para la digestibilidad proteica *in vitro* se observó el valor mas bajo encontrado fue de la HAQ con 64.20 ± 4.45 %, seguido de la HSK con 70.71 ± 2.04 % y finalmente el valor más grande fue de la PO con 73.78 ± 1.56 %. Este puede ser debido a que el proceso de extrusión a altas temperaturas y tiempo cortos favorece la desnaturalización de las proteínas y la gelatinización del almidón, lo que promueve que las enzimas proteolíticas entren de maneras más fácil y encuentren de mejor manera los enlaces peptídicos, mejorando de esta manera la digestibilidad (Moraru & Kokini, 2003; Hoseney, 1999).

Cuadro 7. Contenido de proteína, digestibilidad proteica y relación de eficiencia proteica (C-PER) de la harina de arroz quebrado (HAQ), harina de sake kasu (HSK) y pasta óptima (PO).

	Proteína (%)	Digestibilidad Proteínas (%)	C-PER (%)
Materia prima			
HAQ	06.28 ± 0.10 ^c	64.20 ± 4.45 ^b	1.83
HSK	20.13 ± 0.04 ^a	70.71 ± 2.04 ^a	2.14
Pasta			
PO	13.44 ± 0.06 ^b	73.78 ± 1.56 ^a	2.11

PO: Pasta Optima.; HAQ: Harina de Arroz Quebrado.; HSK: Harina de Sake Kasu. C-PER: Protein **Efficiency Ratio**.

De igual manera, se ha demostrado que la extrusión puede reducir la presencia de factores anti nutricionales como los inhibidores de proteasas, que reduce la digestibilidad en cereales y leguminosas, lo que explica el incremento observado en la PO (Neder-Suárez y col., 2021).

Para la eficiencia proteica calculada (C-PER), se observó que el valor más bajo (1.83), se presentó en la HAQ, mientras que para HSK y PO fueron de 2.14 y 2.11 respectivamente. Esto indica que la incorporación de sake kasu mejora la capacidad de la proteína para ser utilizada en los procesos de crecimiento y mantenimiento tisular, lo cual es consistente con el mejoramiento del perfil de los aminoácidos observados entre la HSK y PO (Motono y col., 2021; Yamashita y col., 2020). El valor de C-PER de la PO (2.11) es similar al reportado por Tsutsui y col. (1998) para dietas con 50% de sake kasu en polvo, las cuales fueron equivalentes en crecimiento a dietas con 20% de caseína. Estos resultados sugieren que la pasta óptima de sake kasu, a pesar de esta hecha a base de HAQ, posee una calidad proteica comparable con la de la caseína, debido al aporte que le suministra el sake kasu y el proceso de extrusión para su elaboración.

4. Fibra dietaria total, soluble e insoluble

La fibra dietaria es un componente fundamental para la alimentación humana. Su consumo está asociado a múltiples beneficios a la salud, incluyendo la regulación del tránsito intestinal, la reducción del colesterol sérico y el control glucémico (Anderson et al., 2009; Theuwissen & Mensink, 2008). Las fibras se clasifican en soluble e insoluble según su comportamiento en soluciones acuosas. Las fibras solubles se caracterizan por formar geles que retrasa la absorción de

moléculas como el colesterol, mientras que las insolubles incrementan el volumen fecal y aceleran el tránsito intestinal (Brown y col., 1999; Maki y col., 2007).

En el **Cuadro 8** se presentan los valores encontrados para fibra dietaria soluble, insoluble y total, para las materias primas (HAQ y HSK) y para la PO. La muestra que presentó menor contenido de fibra total fue la HAQ con 1.45 ± 0.02 %, siendo en su mayoría fibra soluble con 1.11 ± 0.16 % restando fibra insoluble de 0.34 ± 0.01 %. Estos datos concuerdan con los valores de arroz refinado, cuyo contenido de fibra se encuentra principalmente en el salvado y el germen, los cuales son eliminados durante el pulimento (Juliano, 1993; Lerma-García y col., 2009). La HSK mostró un contenido total de fibra mayor con 11.25 ± 0.11 %, teniendo en su mayoría fibra insoluble de 10.51 ± 0.65 % y fibra soluble de 0.75 ± 0.01 %. Estos valores pueden ser atribuidos a que el sake kasu es un subproducto de la fermentación del arroz, el cual posee una alta cantidad de componentes de la pared celular de los microorganismos que pueden funcionar como fibra insoluble, así como también componentes estructurales del arroz el cual ya perdió gran parte de su almidón (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). La fibra insoluble del sake kasu incluye celulosa, hemicelulosa y lignina, así como β -glucanos derivados de las paredes celulares de los microorganismos utilizados en la fermentación (Nakashima y col., 2018; Cerletti y col., 2021).

Por su parte, la PO, presentó un contenido total de fibra mayor a las de la materia prima, con un valor de 12.67 ± 0.08 %. Este comportamiento puede ser atribuido a la combinación de las materias primas y al efecto del proceso de extrusión sobre las mismas.

Cuadro 8. Contenido de fibra dietaria soluble, insoluble y total (%) de la harina de arroz quebrado (HAQ), harina de sake kasu (HSK) y pasta óptima (PO)

Muestra	Fibra dietaria soluble (%)	Fibra dietaria insoluble (%)	Fibra dietaria total (%)
Materia prima			
HAQ	1.11 ± 0.16	0.34±0.01	1.45±0.02
HSK	0.75 ± 0.01	10.51±0.65	11.25±0.11
Pasta			
PO	6.12 ± 0.61	6.55±0.77	12.67±0.08

PO: Pasta Optima.; HAQ: Harina de Arroz Quebrado.; HSK: Harina de Sake Kasu.

La PO mostró un contenido de fibra soluble de 6.12 ± 0.61 % e insoluble de 6.55 ± 0.77 %, lo que representa un gran incremento en fibra soluble comparada con los ingredientes. Esto puede ser debido a que la extrusión a altas temperatura y velocidades de tornillo favorecen la modificación de estructuras poliméricas como las fibras, promoviendo la solubilización parcial de las mismas a través de rupturas de enlaces de hidrogeno y la hidrólisis de enlaces glucosídicos (Menis-Henrique y col., 2020; Stojceska y col., 2008). Este fenómeno ha sido reportado en estudios previos donde la extrusión incrementa la proporción de fibra soluble en productos a base de cereales y subproductos (Altan y col., 2008; Delgado-Nieblas y col., 2019). De igual manera, la extrusión favorece la formación de almidón resistente, el cual se comporta como fibra dietaria insoluble (Hoseney, 1999; Moraru & Kokini, 2003).

Tsutsui y col. (1998) evaluaron la composición de fibra en sake kasu obtenido por fermentación de arroz licuado y reportaron un contenido de fibra de 6.7%, inferior al encontrado en la HSK del presente estudio (11.25%). Esta diferencia puede atribuirse a las condiciones específicas del proceso de fermentación y a la variedad de arroz utilizada. De igual manera, Yamashita y col. (2020) reportaron que el sake kasu contiene β -glucanos derivados de la levadura y el koji, los cuales contribuyen significativamente al contenido de fibra insoluble y a las propiedades funcionales del subproducto.

B. Estudio del proceso

2. Contenido de proteína (PRO)

El contenido de proteína (PRO) es una variable de alto interés en los alimentos, por lo que en la producción de pastas libres de gluten el reto es encontrar

materias primas que mejoren la cantidad y calidad proteínica, a efectos de proporcionar un mejor aporte nutricional al consumidor (Soriano-García & Aguirre-Díaz, 2019). En sake kasu, el mejoramiento de la cantidad de la proteína es proporcionado mayormente por la levadura, ya que este microorganismo concentra la proteína del arroz para su propio crecimiento y reproducción durante la fermentación alcohólica (Yousif y Tinay, AH, 2000). En la **Figura 8** se muestra el efecto de la TE y el CSK sobre el PRO (%) de las pastas alimenticias, a VT constante (100 rpm). Puede observarse que el factor que mostró mayor efecto sobre esta variable de respuesta fue SK, obteniéndose los mayores valores de PRO (15%) a altos niveles de SK (75%) en todo el rango estudiado de TE. Esta tendencia podría atribuirse a que las levaduras presentes a altos niveles de SK muestran mayores porcentajes y calidad de proteínas en relación con el arroz común. Tsutsui y col. (1997) evaluaron el contenido nutrimental de sake kasu, encontrando un valor de proteína de 44.6%, y una calidad proteínica (C-PER) de 89.6 en comparación con los requerimientos de aminoácidos para niños de preescolar. Además, en el trabajo mencionado previamente, se mejoró el contenido de aminoácidos limitantes en el arroz como la lisina.

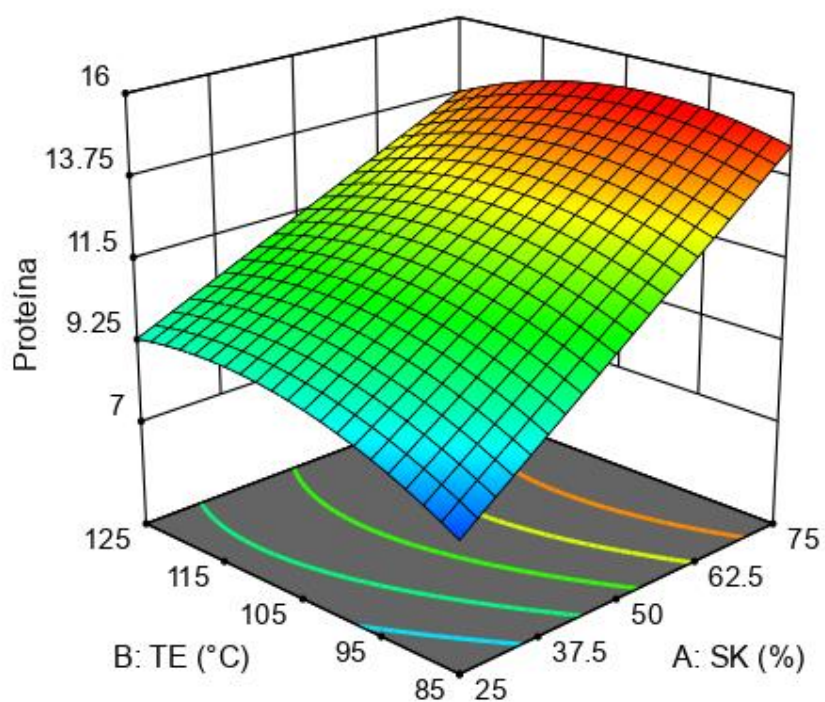


Figura 8. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el contenido de proteína de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

3. Propiedades fisicoquímicas

a. Pérdida de sólidos por cocción (PSC)

La pérdida de sólidos por el proceso de cocción es una variable de interés para los fabricantes de pastas alimenticias, ya que indica la estabilidad de la estructura física de una pasta al momento de ser cocinada, buscando que sea la menor pérdida posible. Al cocinarse, la pérdida de sólidos de la pasta puede deberse a una lixiviación de compuestos en el agua de cocción, siendo indeseable para estos productos (Delgado-Murillo y col, 2024). En la **Figura 9** puede ser observado el efecto de la TE y el SK sobre los valores de PSC, a VT constante (100 rpm). Pueden observarse los mayores valores de PSC (9%) al incrementar los niveles de SK (de 25 a 75%). Este comportamiento puede deberse a una menor estabilidad de la matriz almidón-proteína debido a que gran parte de las proteínas que se encuentran en el sake kasu son proteínas de origen microbiológico, ya que la levadura de sake al crecer la concentra para hacer biomasas. Por lo anterior, el almidón, que tiene alta importancia en la matriz al interaccionar con proteínas en pastas elaboradas con sémola de trigo, en el presente trabajo pudo ser parcialmente degradado por acción de enzimas del hongo *Aspergillus oryzae*, comprometiendo su estructura polimérica, y su capacidad de formación de una matriz estable. Los menores valores (5%) de PSC se obtuvieron a niveles de SK (37.5- 40%) en todo el rango de TE. En la **Figura 10** se puede observar el efecto de la TE y el VT sobre los valores de PSC de las pastas a un SK constante (50%). Los menores valores de PSC (5.7%) fueron obtenidos a alto niveles de TE e intermedios de VT.

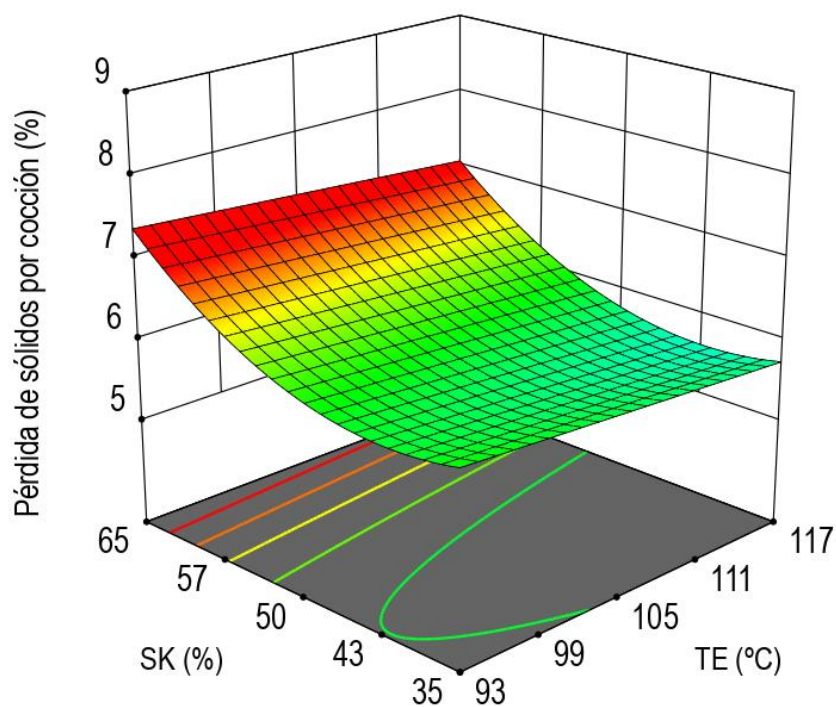


Figura 9. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la pérdida de sólidos por cocción (%) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

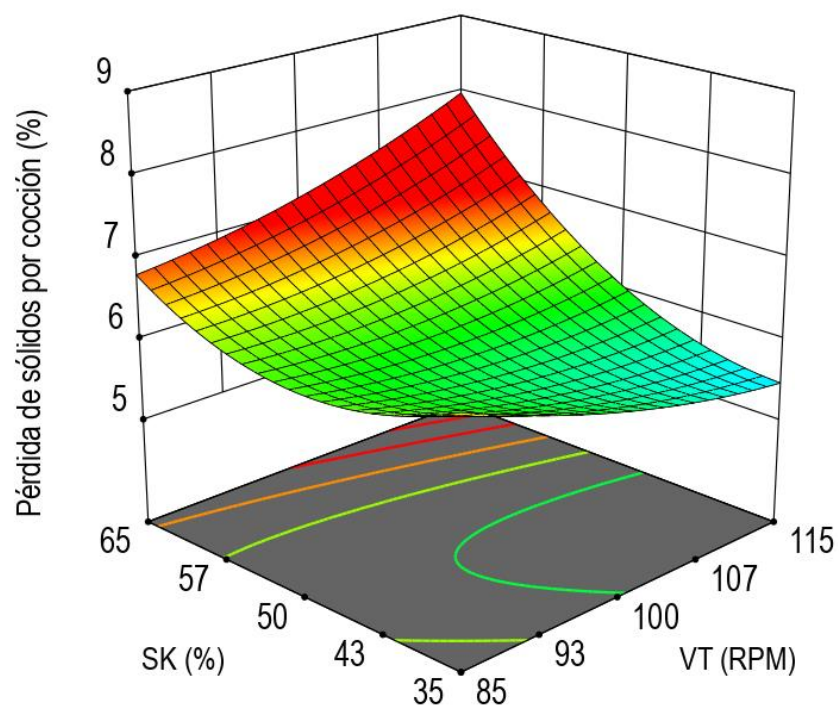


Figura 10. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la velocidad de tornillo (VT) sobre la pérdida de sólidos por cocción (%) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede deberse a que en condiciones intermedias de VT no se presentó alto efecto termo mecánico, por lo que las propiedades de las muestras se vieron menos afectadas al ocurrir una menor fricción dentro del extrusor, permitiendo reducir las PSC en las pastas. La zona con el menor valor de PSC se encontró a TE de 125 °C y VT entre 87.5 y 112.5 rpm (5.7% de PSC). Esto concuerda con lo reportado por Jalgaonkar y col. (2019) y Delgado-Murillo y col. (2024), quienes reportaron el mismo comportamiento para pastas elaboradas a partir de sémola de trigo y mijo perlado y pastas de arroz quebrado y garbanzo respectivamente.

b. Amperaje

Dentro de la fabricación de los alimentos, el trabajo que generan los equipos (en este caso el extrusor) permite conocer de manera indirecta la reología de las materias primas y los materiales que se emplean para hacer los alimentos. En este caso, conocer el parámetro de amperaje del equipo nos permite determinar si una muestra tuvo más o menos trabajo comparado con otras al fluir por el extrusor, dando una explicación de como cada variable de proceso afecta reológicamente el producto. En la **Figura 11** puede ser observado el efecto del contenido de SK y la TE sobre los valores de amperaje, a VT constante (100 rpm). Puede observarse que al incrementar el contenido de SK en todo el rango de TE, los valores de amperaje disminuyeron, alcanzando los menores valores a niveles de SK superiores al 60%.

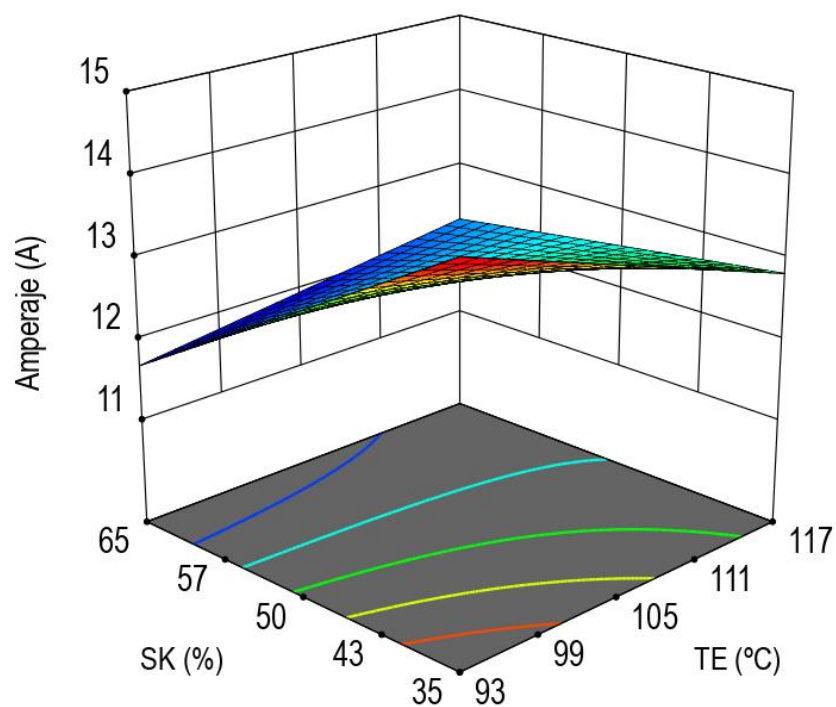


Figura 11. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el amperaje (A) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede deberse a la presencia de fibra soluble en el sake kasu, la cual puede funcionar como lubricante dentro del extrusor, reduciendo el esfuerzo mecánico requerido durante el procesamiento y disminuyendo por ende la demanda energética. Asimismo, al aumentar la TE, particularmente a bajos niveles de SK (mayor proporción de arroz), se observó una disminución adicional del amperaje, lo cual puede atribuirse a la gelatinización del almidón del arroz, que reduce la viscosidad de la masa durante la extrusión al facilitar la interacción agua-almidón (Hoseney, 1999). Este comportamiento concuerda con lo reportado por Hoseney (1999), quien encontró que la gelatinización del almidón durante el procesamiento térmico reduce la viscosidad de las matrices de almidón, disminuyendo la fricción interna y de igual manera el esfuerzo del equipo.

En la **Figura 12** se observa el efecto del contenido de SK y la VT sobre los valores de amperaje, a TE constante. Se muestra que al aumentar la VT en todo el rango de SK evaluado, los valores de amperaje disminuyeron. Este comportamiento puede deberse a que mayores velocidades de tornillo reducen el tiempo de residencia de la muestra dentro del extrusor, disminuyendo la fricción y el esfuerzo mecánico aplicado sobre la matriz, lo que se traduce en una menor demanda energética (Moraru & Kokini, 2003). Asimismo, se observó que al incrementar el contenido de SK, los valores de amperaje también disminuyeron, lo cual se relaciona con el efecto lubricante de la fibra soluble presente en el sake kasu.

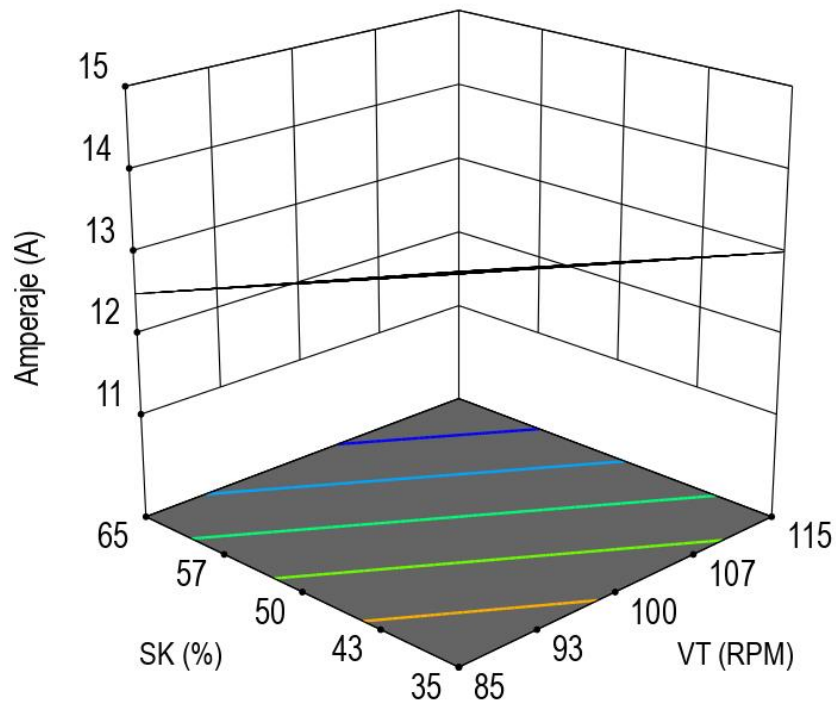


Figura 12. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la velocidad de tornillo (VT) sobre el amperaje (A) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Tsutsui y col. (1998) reportaron que el sake kasu contiene una proporción importante de fibra dietaria (6.7% en base seca), la cual puede modificar las propiedades reológicas de las mezclas durante el procesamiento. Resultados similares fueron reportados por Lue y col. (1991), quienes encontraron que, al agregar fibra en formulaciones extruidas, se reduce la viscosidad de la masa y la demanda energética durante la extrusión.

c. Diferencia total de color (ΔE)

El cambio de color permite conocer, como su nombre lo indica, que tanto el valor de color se modificó con respecto al inicial. Saber si un proceso en específico provoca un cambio de color mayor o menor, es importante, ya que puede explicar algunos cambios nutricionales del producto (como la reacciones entre azúcares reductores y proteínas). En la **Figura 13** puede ser observado el efecto del contenido de SK y la TE sobre los valores de ΔE , a VT constante (100 rpm). Se muestra que al incrementar el contenido de SK en todo el rango de TE, los valores de ΔE aumentaron, alcanzando los mayores valores a niveles de SK superiores al 60%. Este comportamiento puede deberse a que el sake kasu es una fuente importante de proteínas, aminoácidos libres (como la lisina) y azúcares reductores (Tsutsui y col., 1998; Mikami y col., 2020), los cuales actúan como reactivos para la reacción de Maillard durante el procesamiento térmico. De igual manera, al aumentar la TE, particularmente a altos niveles de SK, se observó un incremento adicional en los valores de ΔE . Este efecto puede ser debido a que las altas temperaturas favorecen la formación de compuestos oscuros procedentes de la misma reacción (Maillard) y la caramelización de azúcares (Camire y col., 1997).

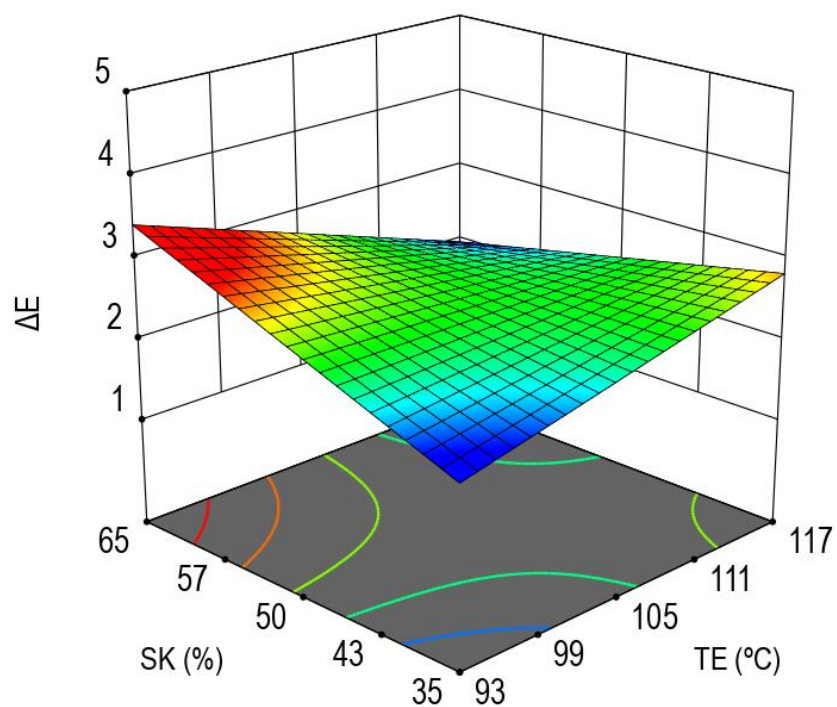


Figura 13. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el cambio de color (ΔE) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

En la **Figura 14** se presenta el efecto del contenido de SK y la VT sobre los valores de ΔE , a TE constante (105°C). Se puede observar que al aumentar la VT y de SK, los valores de ΔE aumentaron. Este comportamiento puede deberse a que mayores velocidades de tornillo incrementan el cizallamiento y la fricción dentro del extrusor, generando condiciones mecánicas más severas que pueden promover la reacción de Maillard (Moraru & Kokini, 2003). Asimismo, se observó que al incrementar el contenido de SK, los valores de ΔE también aumentaron, lo cual se relaciona con el mayor contenido de proteínas, aminoácidos libres y azúcares reductores aportados por el sake kasu. Saito y col. (1994) reportaron que el sake kasu contiene péptidos y aminoácidos libres que pueden participar en reacciones de pardeamiento durante el procesamiento térmico. Adicionalmente, Nishidono y col. (2024) mencionaron que el sake kasu con mayor tiempo de añejamiento presenta un color más oscuro debido a la formación de productos de Maillard, lo que respalda la relación entre el contenido de sake kasu y el aumento del ΔE .

d. Diámetro de la pasta

Dentro del mercado de pastas alimenticias, los productores especifican el grosor de las pastas alimenticias, con el fin de tener variedad de productos para distintos platillos. En este caso la medición del diámetro nos permite determinar en qué condiciones o que variables provocan un aumento en el diferencial de presión a la salida del extrusor. Para la variable de respuesta diámetro de la pasta, en la **Figura 15** se muestra el efecto del contenido de SK y la TE, a VT constante (100 rpm). Al incrementar el contenido de SK en todo el rango de TE, los valores de diámetro disminuyeron.

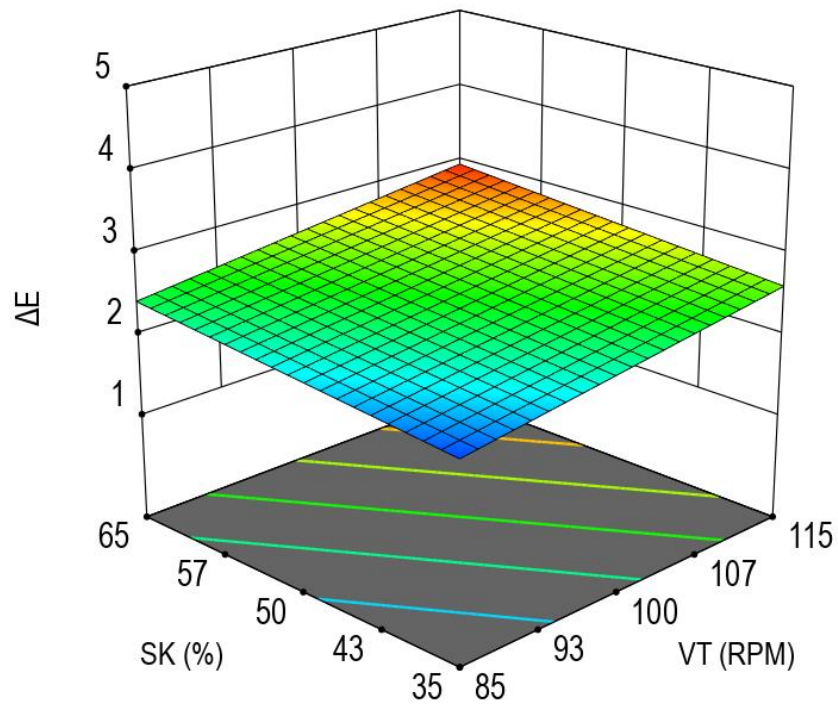


Figura 14. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la velocidad de tornillo (VT) sobre el cambio de color (ΔE) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

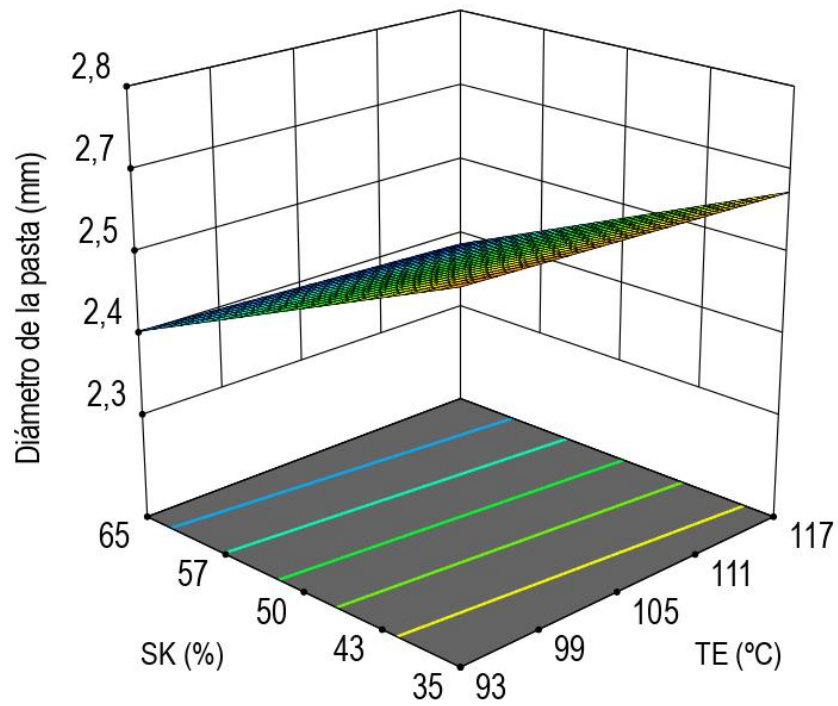


Figura 15. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el diámetro de la pasta (mm) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede deberse a la presencia de fibra soluble en el sake kasu, la cual actúa como lubricante dentro del extrusor, reduciendo la presión en el dado y limitando la expansión del producto a la salida (Lue y col., 1991; Tsutsui y col., 1998). A su vez, la TE no presentó un efecto significativo sobre el diámetro de la pasta en las condiciones evaluadas, lo que sugiere que este parámetro tiene una influencia limitada en comparación con el contenido de SK.

En la **Figura 16** se presenta el efecto del contenido de SK y la VT sobre los valores de diámetro de la pasta, a TE constante (105°C). Al aumentar la VT en todo el rango de SK evaluado, los valores de diámetro se incrementaron. Este comportamiento puede atribuirse a que mayores velocidades de tornillo generan un aumento en la presión dentro del extrusor, favoreciendo una mayor expansión del material al pasar a través del dado (Moraru & Kokini, 2003). Por otro lado, al incrementar el contenido de SK, los valores de diámetro disminuyeron, lo cual se relaciona con el efecto lubricante de la fibra soluble presente en el sake kasu, que reduce la presión de salida. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Ito y col. (2022), quienes encontraron que la inclusión de sake kasu en formulaciones extruidas modifica las propiedades reológicas de la masa, afectando la expansión del producto final.

e. Índice de expansión

En la **Figura 17** se muestra el efecto del contenido de SK y la TE sobre los valores de IE de las pastas, a una VT constante (100 rpm). Al incrementar el contenido de SK en todo el rango de TE, los valores de índice de expansión disminuyeron.

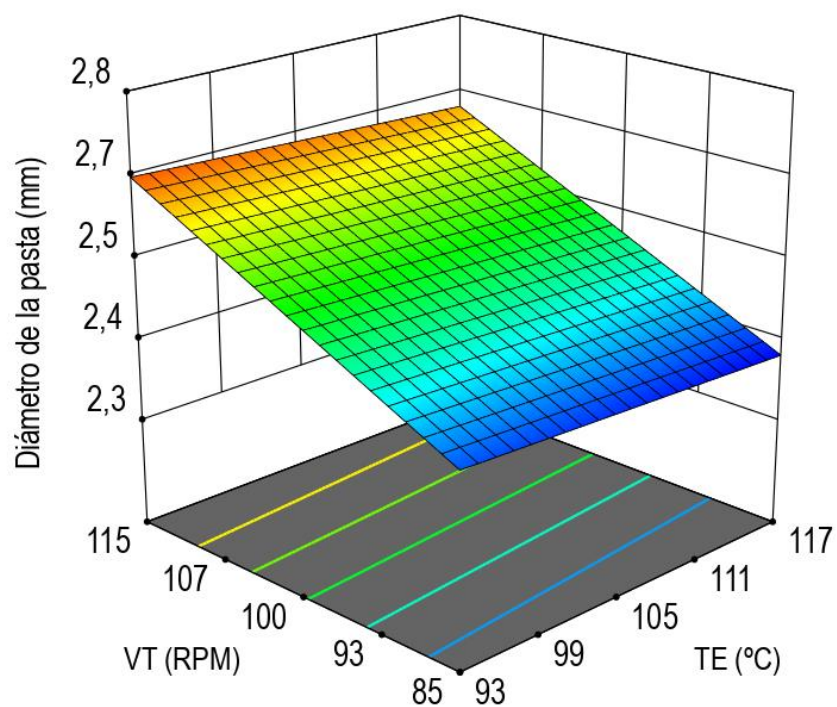


Figura 16. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el diámetro de la pasta (mm) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

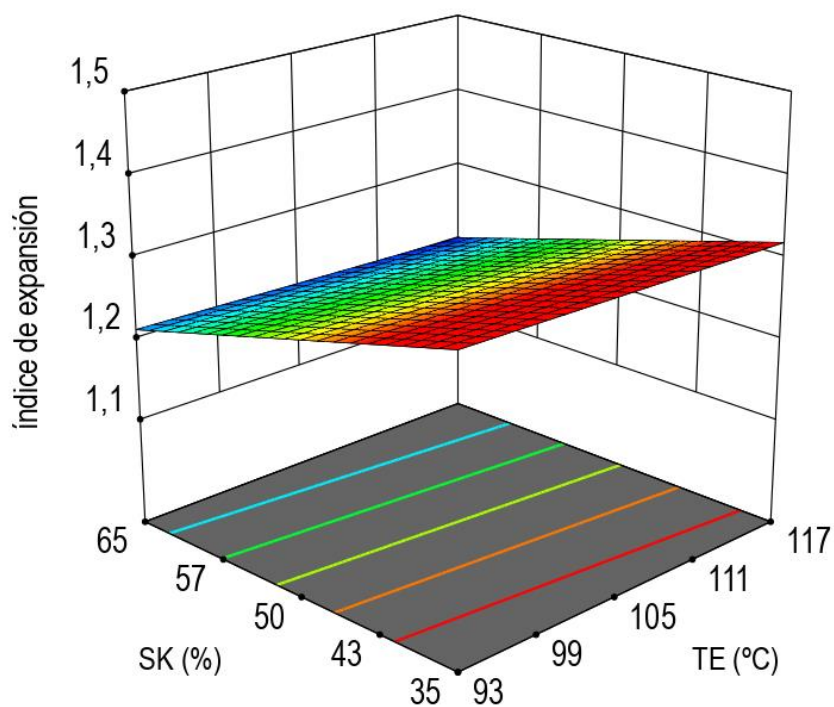


Figura 17. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de expansión de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede deberse a la presencia de fibra soluble en el sake kasu, la cual, como se explicó anteriormente, actúa como lubricante dentro del extrusor, reduciendo la presión en el dado y limitando la capacidad de expansión del producto a la salida (Lue y col., 1991; Tsutsui y col., 1998). En contraste, la TE no presentó un efecto significativo sobre el índice de expansión en las condiciones evaluadas, lo que sugiere que este parámetro tiene poco efecto en comparación con el contenido de SK.

En la **Figura 18** se presenta el efecto del contenido de SK y la VT sobre los valores de índice de expansión, a TE constante (105°C). Al aumentar la VT en todo el rango de SK evaluado, los valores de índice de expansión se incrementaron. Este comportamiento puede atribuirse a que mayores velocidades de tornillo generan un aumento en la presión dentro del extrusor, favoreciendo una mayor expansión del material al pasar a través del dado (Moraru & Kokini, 2003). Por otro lado, al incrementar el contenido de SK, los valores de índice de expansión disminuyeron. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Ito y col. (2022), quienes encontraron que la inclusión de sake kasu en formulaciones extruidas modifica las propiedades reológicas de la masa, afectando la expansión del producto final.

f. Densidad aparente

En la **Figura 19** puede apreciarse el efecto combinado del contenido de SK y la TE sobre la densidad aparente de la pasta cruda, manteniendo la VT en 100 rpm. Al incrementar la TE, específicamente a bajos niveles de SK, se presentó una disminución en los valores de densidad aparente.

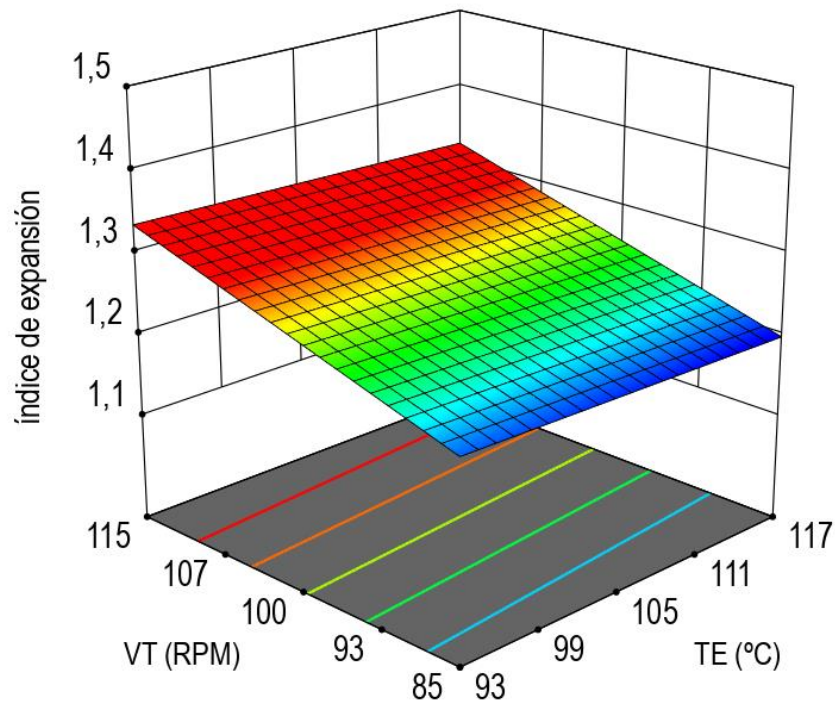


Figura 18. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de expansión de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

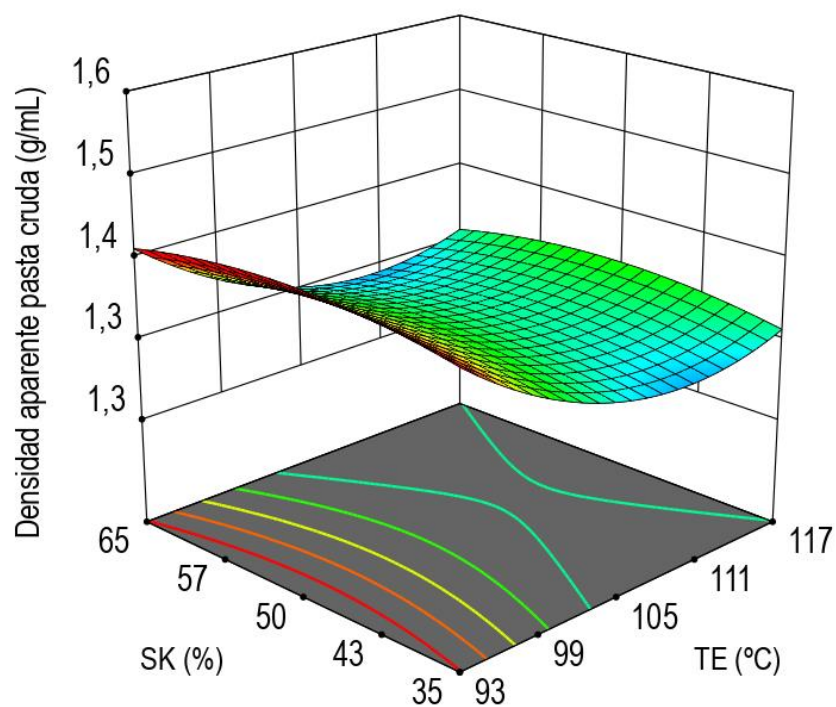


Figura 19. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la densidad aparente de la pasta cruda (g/mL) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede atribuirse a la gelatinización del almidón, la cual modifica la estructura polimérica de la matriz, favoreciendo la formación de una red más expandida y reduciendo la densidad del producto (Hoseney, 1999). Sin embargo, al aumentar el contenido de SK en todo el rango de TE, los valores de densidad aparente se incrementaron. Este efecto puede ser debido a la presencia de beta glucanos en el sake kasu, la cual actúa como lubricante dentro del extrusor, reduciendo la presión en el dado y limitando la expansión del material a la salida, lo que resulta en una estructura más compacta y con mayor densidad (Lue y col., 1991). De igual manera, en la **Figura 20** se muestra la interacción entre el contenido de SK y la VT sobre la densidad aparente de la pasta cruda, con TE fija en 107 °C. Al aumentar la VT a lo largo de todo el rango de SK evaluado, los valores de densidad aparente disminuyeron. Este comportamiento puede explicarse por el incremento en la presión generada dentro del extrusor al elevar la VT, lo que favorece una mayor expansión del material al pasar por el dado y, por consecuencia, reduce la densidad del producto (Moraru & Kokini, 2003). Por otro lado, el aumento en el contenido de SK provocó un incremento en la densidad aparente, lo cual se relaciona con el efecto lubricante de la fibra soluble, limitando la capacidad de expansión de la matriz (Tsutsui y col., 1998; Ito y col., 2022).

g. Índice de absorción de agua

El comportamiento del IAA en función del contenido de SK y la TE se presenta en la **Figura 21**, manteniendo la VT constante en 100 rpm. Los mayores valores de IAA se obtuvieron a bajos contenidos de SK (< 18 %) combinados con altas TE (> 115 °C).

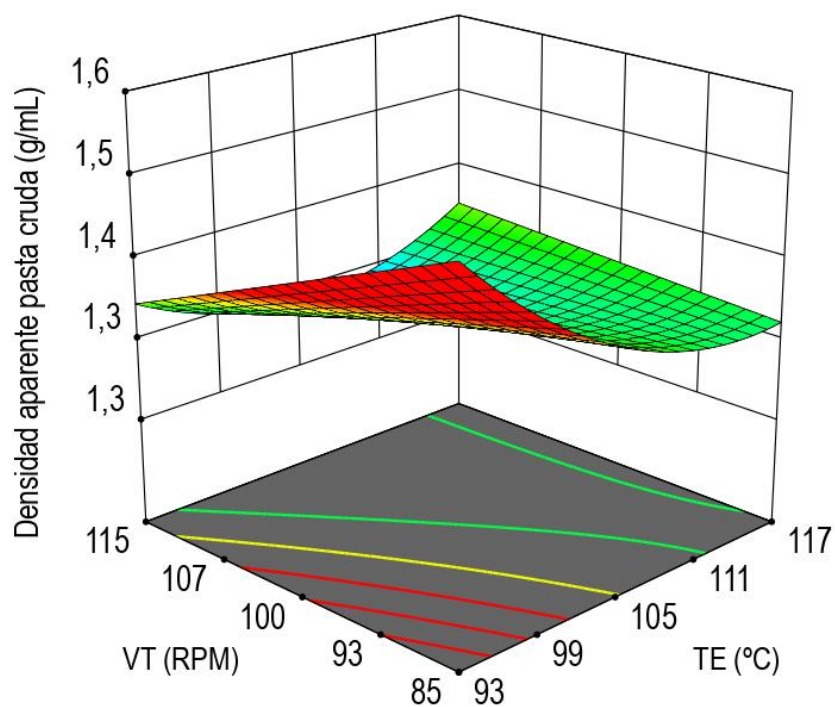


Figura 20. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la densidad aparente de la pasta cruda (g/mL) adicionada con sake kasu de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

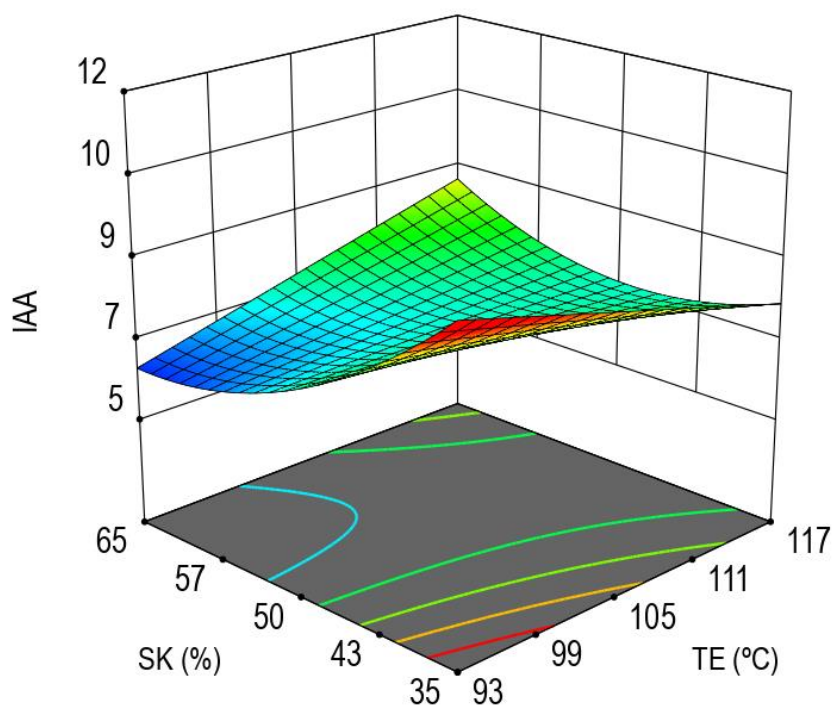


Figura 21. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre índice de absorción de agua (IAA) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede deberse a que el SK es un material preprocesado derivado de la fermentación del sake, el cual ha sufrido modificaciones estructurales que limitan la disponibilidad de almidón libre para gelatinizar durante la extrusión (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). Por otro lado, el incremento de la TE favorece la gelatinización del almidón presente en el arroz quebrado, lo que genera una matriz más estable con mayor capacidad para retener agua (Hoseney, 1999). Adicionalmente, las altas temperaturas pueden contrarrestar el efecto lubricante que ejerce el SK dentro del extrusor, permitiendo una mayor modificación estructural del almidón y, consecuentemente, una mayor absorción de agua. Este comportamiento concuerda con lo reportado por López-Díaz y col. (2025), quienes observaron que al aumentar la proporción de SK en pastas a base de arroz quebrado, los valores de IAA disminuyeron debido al menor contenido de almidón disponible en la formulación.

h. Índice de solubilidad en agua

El efecto sobre el ISA en función del contenido de SK y la TE se presenta en la **Figura 22**, manteniendo la VT constante en 100 rpm. Los mayores valores de ISA se obtuvieron a altos contenidos de SK (> 60 %) combinados con baja TE. Este comportamiento puede deberse a que el SK es un material preprocesado derivado de la fermentación del sake, el cual presenta un alto contenido de sólidos solubles, incluyendo proteínas, péptidos, aminoácidos libres y azúcares (Tsutsui y col., 1998; Mikami y col., 2020), que se liberan fácilmente al agua.

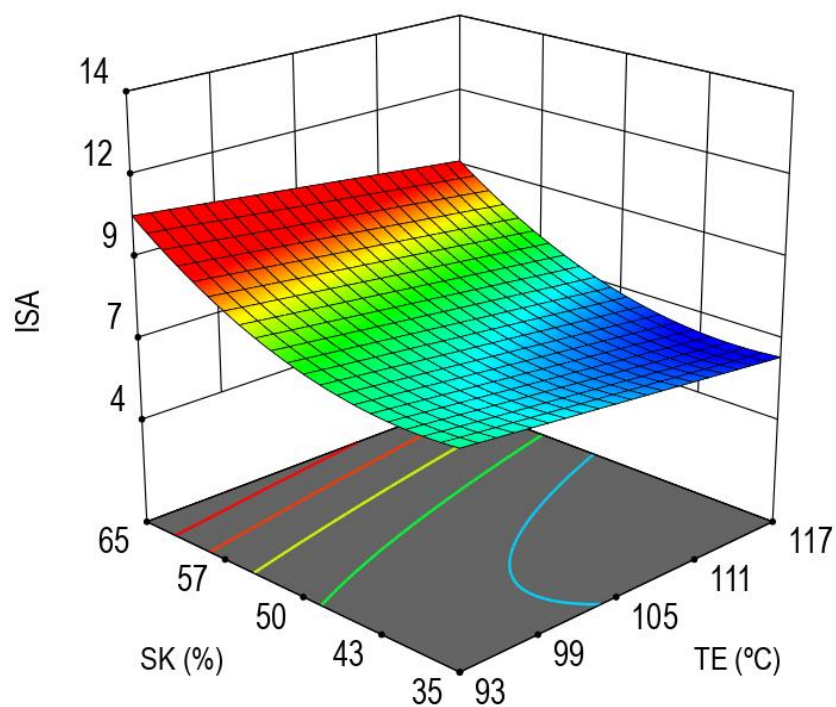


Figura 22. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de solubilidad de agua (ISA) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Por otro lado, el incremento de la TE favorece la gelatinización y modificación estructural del almidón presente en el arroz quebrado, lo que disminuye la solubilidad de los compuestos en la matriz (Hoseney, 1999). Este comportamiento concuerda con lo reportado por Delgado-Murillo y col. (2024), quienes observaron que la adición de harina de garbanzo en pastas a base de arroz quebrado incrementó los valores de ISA debido al mayor contenido de sólidos solubles aportados por la leguminosa.

i. Tiempo óptimo de cocción

El efecto en el tiempo óptimo de cocción en función del contenido de SK y la TE se presenta en la **Figura 23**, manteniendo la VT constante en 100 rpm. Los mayores tiempos de cocción (> 11 min) se obtuvieron a bajos contenidos de SK combinados con altas TE (> 115 °C). Este comportamiento puede deberse a que en estas condiciones extremas se favorece una alta gelatinización del almidón presente en el arroz quebrado, formando una matriz más estable y resistente a la penetración del agua durante la cocción (Hoseney, 1999). Por el contrario, a altos contenidos de SK (> 24 %) se observaron menores tiempos de cocción (< 9 min), lo cual puede atribuirse a la presencia de sólidos solubles y fibra soluble en el sake kasu, que facilitan la hidratación de la pasta al interrumpir la continuidad de la matriz de almidón (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019).

En la **Figura 24** se muestra el efecto de la VT y la TE sobre el tiempo óptimo de cocción, con SK constante en 17.5 %. Los mayores tiempos de cocción (> 11 min) se presentaron a altas TE (> 115 °C) combinadas con altas VT (> 130 rpm).

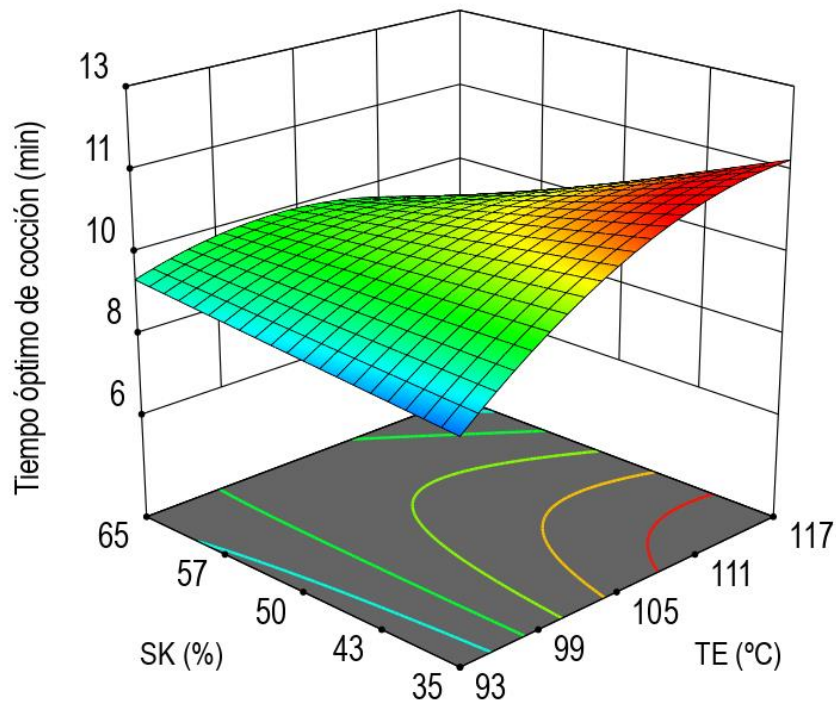


Figura 23. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el tiempo optimo de cocción (min) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

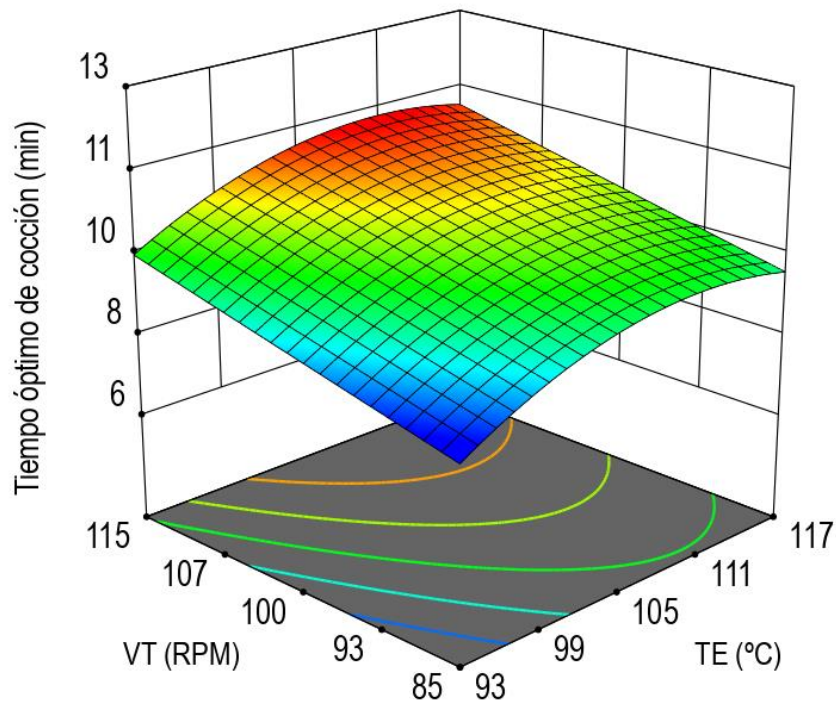


Figura 24. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el tiempo optimo de cocción (min) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede atribuirse a las condiciones extremas de procesamiento (alta temperatura y alta velocidad de tornillo) que generan un mayor efecto termo-mecánico dentro del extrusor, lo que favorece una mayor gelatinización del almidón y la formación de una matriz más estable y resistente a la hidratación (Moraru & Kokini, 2003). Por otro lado, a bajas TE ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y bajas VT ($< 90\text{ rpm}$) se observaron menores tiempos de cocción, lo cual se relaciona con una menor modificación estructural del almidón, resultando en una matriz menos compacta que facilita la penetración del agua. El comportamiento observado en ambas figuras se relaciona estrechamente con la densidad aparente de las pastas. Las condiciones que generan una estructura más compacta y densa (bajos SK con altas TE, o altas TE con altas VT) requieren mayor tiempo para que el agua penetre hasta el centro de la pasta durante la cocción. En contraste, las pastas con menor densidad aparente (asociada a mayor contenido de SK o condiciones menos severas) presentan una estructura menos compacta que facilita la penetración del agua, reduciendo el tiempo de cocción. Resultados similares fueron reportados por Delgado-Murillo et al. (2024), quienes observaron que, en pastas a base de arroz quebrado y harina de garbanzo, el tiempo de cocción disminuyó al aumentar el contenido de leguminosa en la formulación debido a la interrupción de la matriz de almidón.

4. Compuestos bioactivos

a. Compuestos fenólicos libres (CFLib)

Los compuestos fenólicos son un grupo de metabolitos secundarios ampliamente distribuidos en los alimentos, los cuales han sido asociados con un

potencial efectos benéficos a la salud, debido a su potencial capacidad antioxidante, antiinflamatoria, antihiperlipidémica, entre otros (Tsutsui y col., 1998; Yamashita y col., 2020). Los compuestos fenólicos pueden presentarse en forma libre o ligada. La fracción libre es aquella que puede extraerse directamente con solventes orgánicos y se considera biodisponible, ya que no requiere de hidrólisis previa para su absorción en el tracto gastrointestinal (Adom & Liu, 2002). Durante el procesamiento por extrusión, las condiciones de temperatura, humedad y cizallamiento pueden modificar la estructura de la matriz alimentaria, favoreciendo la liberación de compuestos fenólicos previamente ligados y aumentando su extracción.

En la **Figura 25** se presenta el comportamiento de los compuestos fenólicos libres en función del contenido de SK y la TE, manteniendo la VT constante (100 rpm). Se observaron dos zonas donde se obtuvieron los mayores valores de compuestos fenólicos libres (> 115 mg EAG/100 g b.s.). La primera zona se localizó a bajos contenidos de SK (25 %) combinados con altas TE (125 °C). Este comportamiento puede atribuirse a que las altas temperaturas favorecen la ruptura de los enlaces que mantienen a los compuestos fenólicos ligados a la pared celular del arroz, particularmente el ácido ferúlico y otros ácidos (como el hidroxicinámicos), incrementando su liberación a la fracción libre (Delgado-Murillo y col., 2024). La segunda zona de altos valores se presentó a contenidos alto de SK (75 %) y TE intermedia (100-115 °C). esto puede ser debido al aporte de compuestos fenólicos provenientes del sake kasu, el cual ha sido reportado como una fuente importante de compuestos bioactivos derivados de la fermentación (Tsutsui y col., 1998; Motono y col., 2021). Sin embargo, al aumentar la temperatura de extrusión, la

concentración disminuye. Este comportamiento puede deberse a qué condiciones extremas de procesamiento (alta temperatura) generan una mayor severidad térmica que puede provocar la degradación de los compuestos fenólicos, reduciendo su concentración en la fracción libre. Kawakami y col. (2017) encontraron que el tratamiento térmico prolongado puede afectar los compuestos fenólicos, disminuyendo su cantidad y por ende su actividad. Asimismo, Yamashita y col. (2020) reportaron que las condiciones severas de procesamiento pueden modificar la estructura de los compuestos bioactivos en extractos de sake kasu, afectando su recuperación.

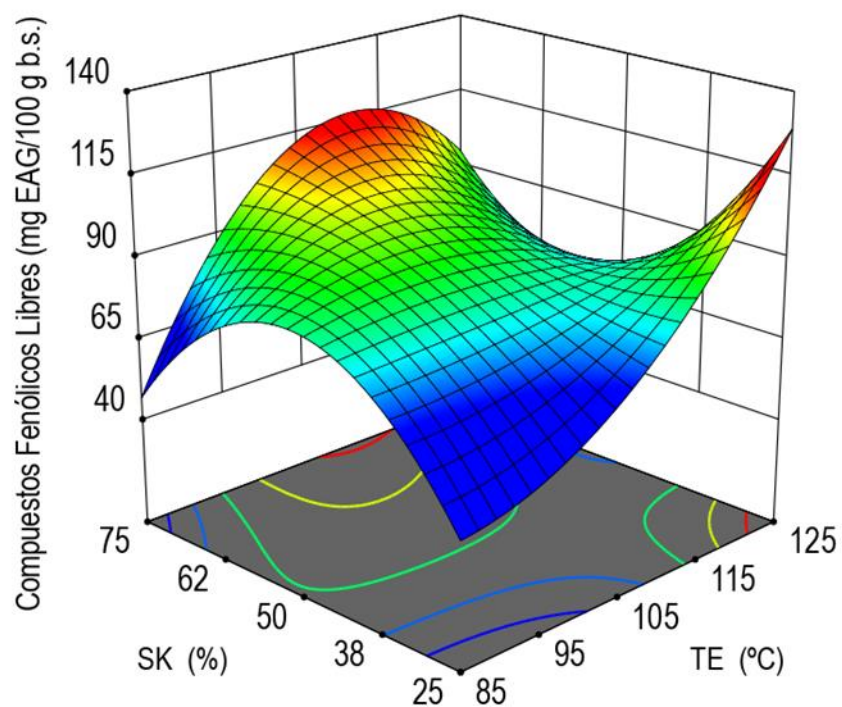


Figura 25. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos libres (mg EAG/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

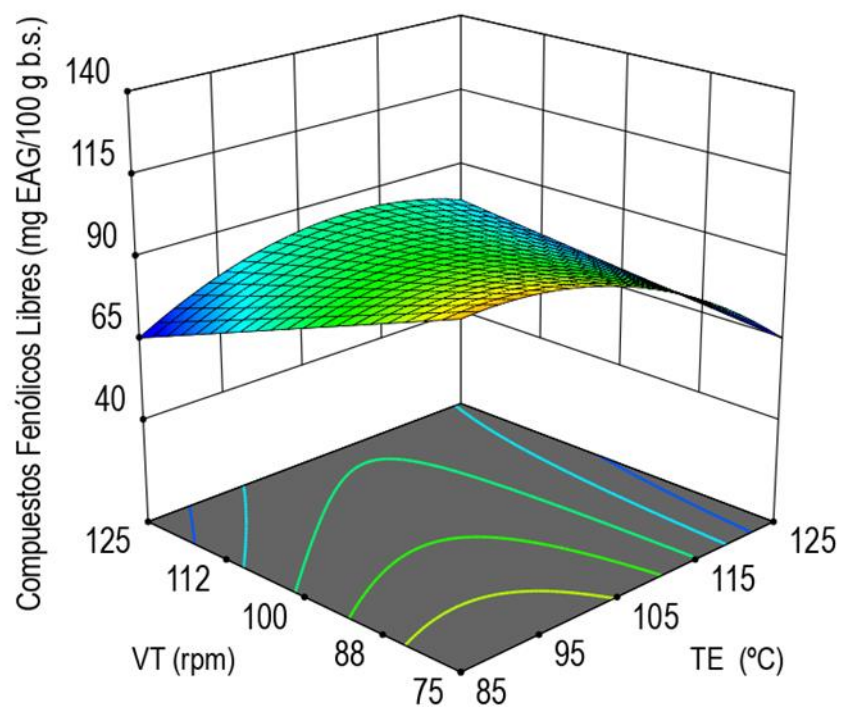


Figura 26. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos libres (mg EAG/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

b. Compuestos fenólicos ligados (CFLig)

Los compuestos fenólicos ligados son todos aquellos compuestos que se encuentran unidos de forma estable a la matriz celular de los componentes, siendo necesario una hidrólisis alcalina-ácida para su liberación y extracción (Adom & Liu, 2002; Mora-Rochin y col., 2010). Este tipo de compuestos son la fracción más abundante del total de fenólicos en cereales y subproductos, y su liberación mediante la digestión o el procesamiento ayuda a contribuir de manera importante a la capacidad antioxidante de los alimentos. La cuantificación de estos compuestos permite evaluar el impacto de las condiciones de extrusión sobre la disponibilidad de compuestos bioactivos que permanecen retenidos en la matriz alimentaria (De la Parra et al., 2007).

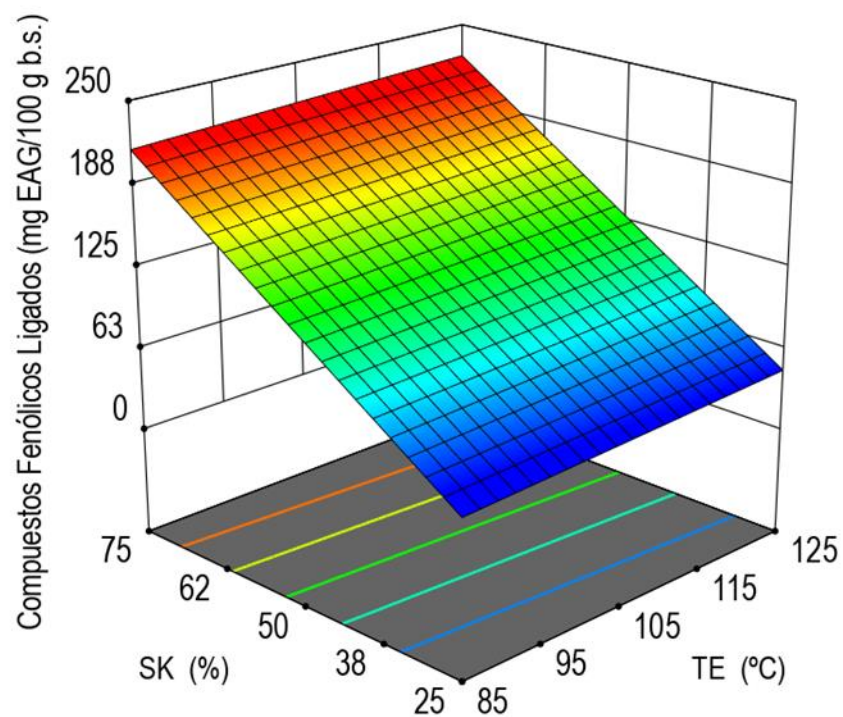


Figura 27. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos totales (mg EAG/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

c. Compuestos fenólicos totales (CFT)

En la Figura 3 se muestra el efecto de la TE y SK sobre el contenido de CFT en las pastas alimenticias, a TV constante (100 rpm). Puede ser observado que al aumentar SK en todo el rango de TE los valores de CFT se incrementaron, obteniéndose su valor máximo a 75% de SK (397.55 mg EAG/ 100 g d.b.). Este comportamiento puede relacionarse con el mayor contenido de CFT presentado en sake kasu (780.72±58.31 mg EAG/ 100 g d.b.) en relación al mostrado por HAQ (37.03±2.52 mg EAG/ 100 g d.b.), que fue la otra materia prima utilizada para la producción de las pastas. Este efecto puede ser debido a que el sake kasu es un material proveniente de una fermentación. Ramírez-Esparza y col. (2024) reportaron que la fermentación puede producir la liberación de compuestos fenólicos, ya que los microorganismos generan enzimas que pueden liberar este tipo de compuestos, provocando que se encuentren biodisponibles. Hatanaka y col (2015) menciona que la proteína de sake kasu posee alto contenido de compuestos como la fenilalanina, aumentando el valor de CFT. Además, menciona que los procesos térmicos generan la desnaturalización y el rompimiento de proteínas en dipéptidos con alto TPC y que además poseen actividad antioxidante.

En la **Figura 28** se observa el comportamiento de los compuestos fenólicos ligados en función del contenido de SK y la TE, manteniendo la VT constante (100 rpm). Se observó que el valor de esta variable fue incrementando a medida que el SK fue creciendo, en todo el rango de TE evaluado, siendo el punto más alto a 75% de SK.

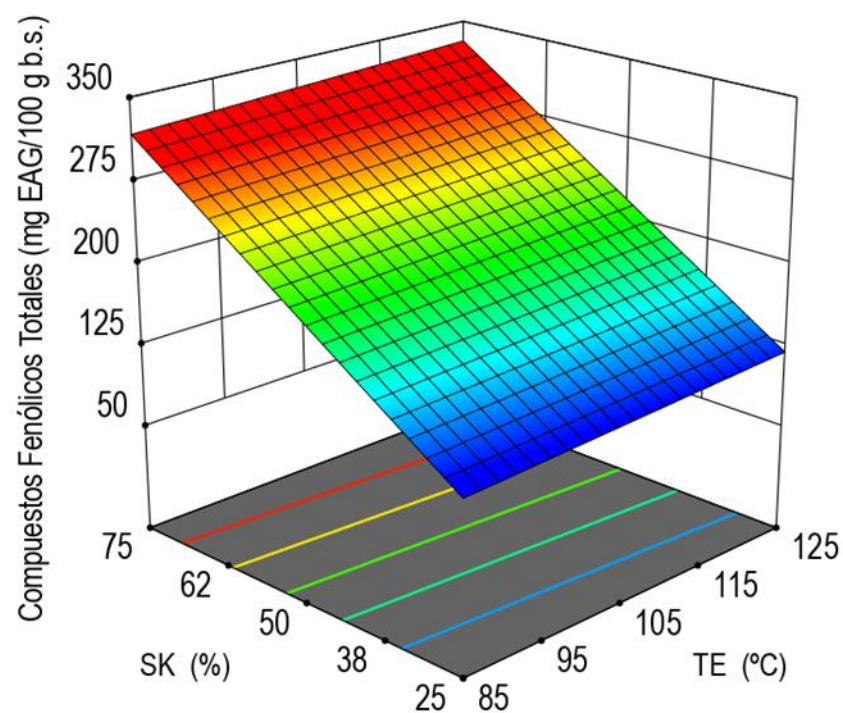


Figura 28. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre los compuestos fenólicos totales (mg EAG/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento puede atribuirse al elevado contenido de compuestos fenólicos presentes en el sake kasu, el cual ha sido reportado como una fuente importante de compuestos bioactivos derivados del proceso fermentativo (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). Adicionalmente, las proteínas presentes en el sake kasu contienen aminoácidos como tirosina, triptófano y fenilalanina, los cuales poseen anillos aromáticos en su estructura y pueden reaccionar con el reactivo de Folin-Ciocalteu, contribuyendo a los valores medidos en la fracción ligada (Singleton y col., 1999). Este fenómeno ha sido documentado previamente por Kawakami y col. (2017), quienes reportaron que los péptidos derivados del hidrolizado de sake kasu presentan actividad antioxidante y pueden interferir en la cuantificación de compuestos fenólicos por el método de Folin-Ciocalteu.

d. Actividad antioxidante libre por el método de ABTS

El ensayo para determinar la actividad antioxidante por ABTS es un método colorimétrico ampliamente utilizado para la determinación la funcionalidad de los alimentos y extractos vegetales. Esto mediante la activación del radical catión ABTS⁺ y colocándolo en contacto con el extracto rico compuestos antioxidantes disminuyendo su concentración de manera proporcional al contenido del compuesto bioactivo (Re y col. 1999). Este radical puede utilizarse tanto en compuestos hidrofílicos como lipofílicos, teniendo una visión más amplia del perfil antioxidante de la muestra de los alimentos (Munteanu & Apetrei, 2021). La fracción libre corresponde a los compuestos que pueden ser extraídos directamente con solventes orgánicos, sin la necesidad de realizar alguna hidrólisis previa, ayudando su absorción en el intestino.

En la **Figura 29** se muestra el efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por el método de ABTS libre, manteniendo la velocidad de tornillo constante (100 rpm). Se observó que al aumentar el contenido de SK la capacidad antioxidante aumentó de forma lineal, teniendo como punto máximo la concentración más alta de SK y temperatura de extrusión de 125 °C (de 564 a 1100 $\mu\text{mol ET/ 100 g b.s.}$). Esto puede ser debido a la alta concentración de compuestos bioactivos con actividad antioxidante presentes en el sake kasu, incluyendo compuestos fenólicos, péptidos bioactivos y aminoácidos procedentes del proceso de fermentación y extrusión (Tsutsuiy col., 1998; Izu y col., 2019; Motono y col., 2021).

e. Actividad antioxidante ligado por el método de ABTS

Los compuestos antioxidantes pueden estar presentes de forma libre o ligada a las estructuras de los alimentos, como polisacáridos de la pared celular, proteínas u otras moléculas de mayor tamaño, que no permiten ser extraídos con solventes orgánicos, siendo requerida un proceso de hidrólisis (alcalina/ácida) para su correcta extracción (Adom & Liu, 2002). La evaluación de este tipo de compuestos antioxidantes es fundamental, ya que estos pueden ser liberados de forma total o parcial en el tracto gastrointestinal, contribuyendo de forma significativa al efecto total del alimento (Mora-Rochin y col., 2010).

El la **Figura 30** se puede observar el efecto del contenido de SK y la TE, sobre la actividad antioxidante ABTS de los compuestos ligados, manteniendo la velocidad de tornillo constante (100 rpm).

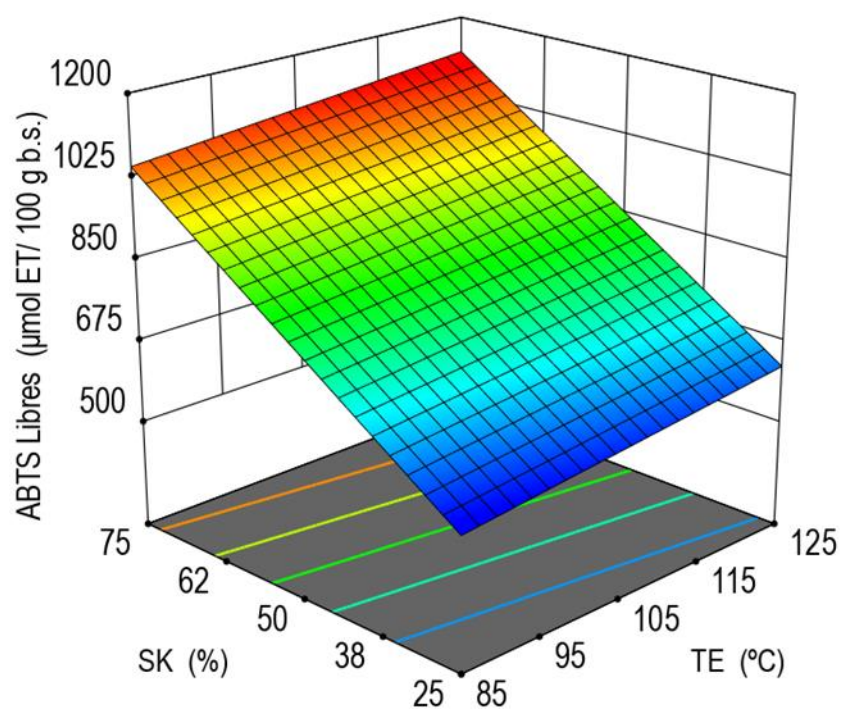


Figura 29. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS libres (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

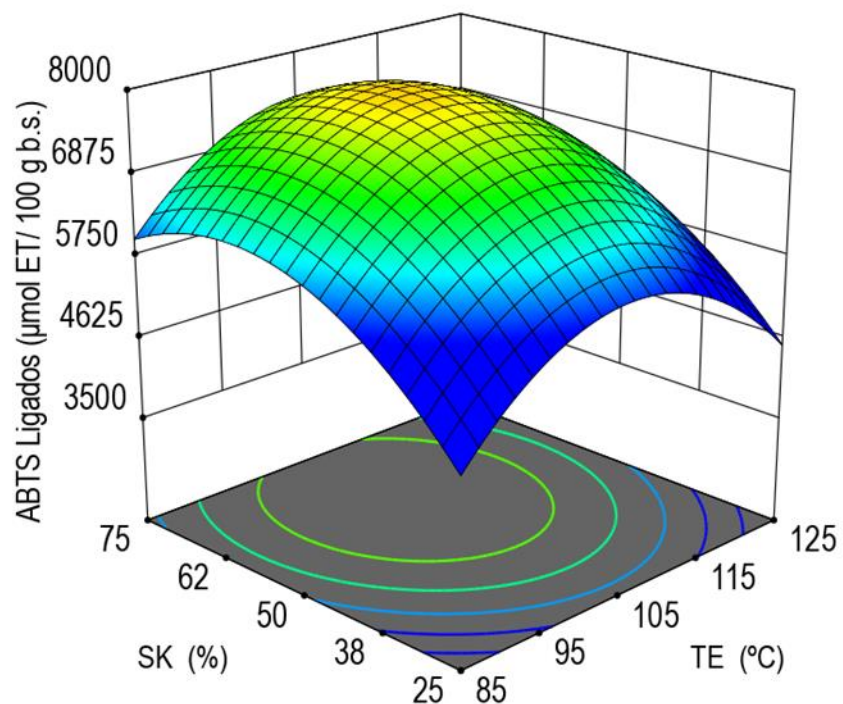


Figura 30. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS ligados (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Se observa que el contenido más alto (7783 mg ET/100 g b.s.) se presentó a temperatura de extrusión intermedia (105 °C) y contenido de sake kasu de 62 %. Esto puede ser debido al efecto de las condiciones de la muestra y del proceso de extrusión. Al aumentar el contenido de sake kasu, se observa un aumento en la actividad antioxidante, esto debido a que posee alta concentración de compuestos bioactivos desde la materia prima. Sin embargo, al superar el nivel de 60% la actividad antioxidante se ve disminuida ya que el SK es rico en fibra dietaria, la cual puede actuar como lubricante en el extrusor, disminuyendo el tiempo de residencia y la exposición a la temperatura, así como el efecto de cizalla sobre la muestra, disminuyendo la activación de algunos componentes antioxidantes (desnaturalización de proteínas, así como su hidrólisis parcial). Este efecto se observa de igual manera con la temperatura de extrusión, observándose un aumento hasta la temperatura de 105 °C y disminuyendo a temperaturas más altas. Esto puede ser debido a que, al aumentar la temperatura, los compuestos pierden su actividad antioxidante (Yamashita y col., 2020).

En la **Figura 31** se presenta el efecto de la TE y la VT sobre la actividad antioxidante por ABTS de los compuestos ligados, manteniendo constante el contenido de SK (50%). Se presentó un punto máximo de actividad antioxidante se localiza a 105 °C de TE y 100 rpm de VT. Al incrementar ambos factores de estudio, el valor de la capacidad antioxidante aumenta hasta alcanzar dicho máximo, para posteriormente disminuir. Este comportamiento puede deberse a que tanto la TE como la VT son factores que aplican energía a la matriz polimérica durante el proceso de extrusión (Moraru & Kokini, 2003).

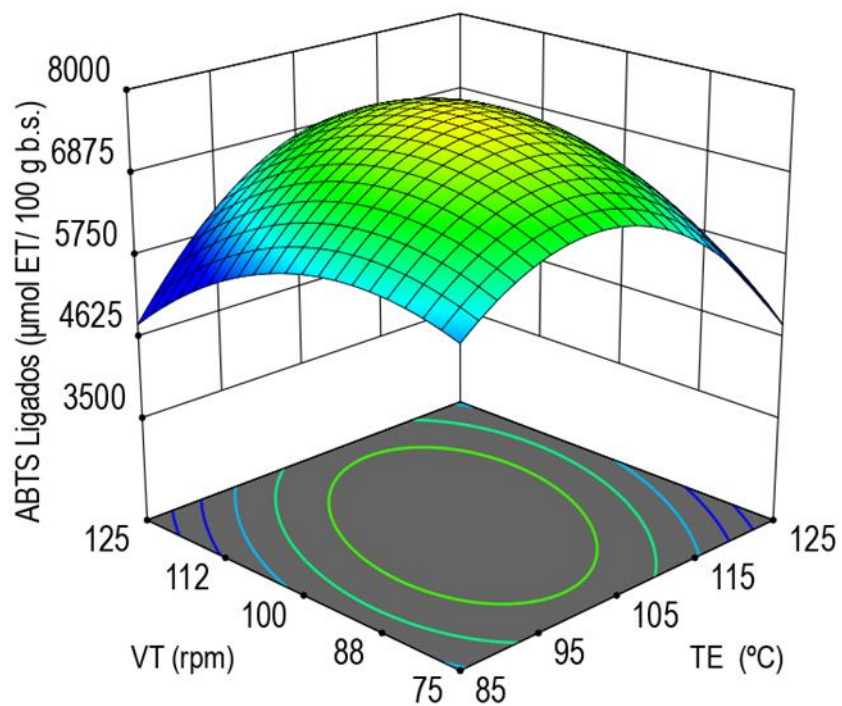


Figura 31. Efecto la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS ligados (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Al aumentar dicha energía de manera moderada, los gránulos de almidón comienzan a gelatinizarse parcialmente, formando una matriz más estable que puede interactuar con los compuestos fenólicos y péptidos antioxidantes presentes en el sake kasu, favoreciendo su retención en la fracción ligada (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). La energía aplicada puede inducir la formación de complejos entre el almidón gelatinizado y los compuestos fenólicos a través de enlaces no covalentes, lo que limita su extracción en la fracción libre, pero aumenta su recuperación tras la hidrólisis alcalina (Mora-Rochin y col., 2010). Sin embargo, al superar los 105 °C de TE o los 100 rpm de VT, los compuestos antioxidantes disminuyen, debido, probablemente, a que condiciones extremas de procesamiento generan una excesiva degradación térmica y mecánica de los compuestos bioactivos, afectando su estructura química y reduciendo su capacidad antioxidante (Neder-Suárez y col., 2021; Yamashita y col., 2020). Este comportamiento sugiere que existe un rango óptimo de procesamiento donde se maximiza la retención de compuestos antioxidantes en la matriz alimentaria, más allá del cual predominan los efectos degradativos del proceso.

f. Actividad antioxidante total por el método de ABTS

En la **Figura 32** se muestra el efecto del contenido de SK y la TE sobre el ABTS total, a VT constante (100 rpm). En ella se observa un punto máximo a condiciones altas de SK y a 105 °C de TE (8824.80 $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g d.b.}$). Se observa que, al momento de aumentar el SK, el valor de TABTS aumenta, esto presenta evidencia de que el potencial antioxidante lo proporciona el SK.

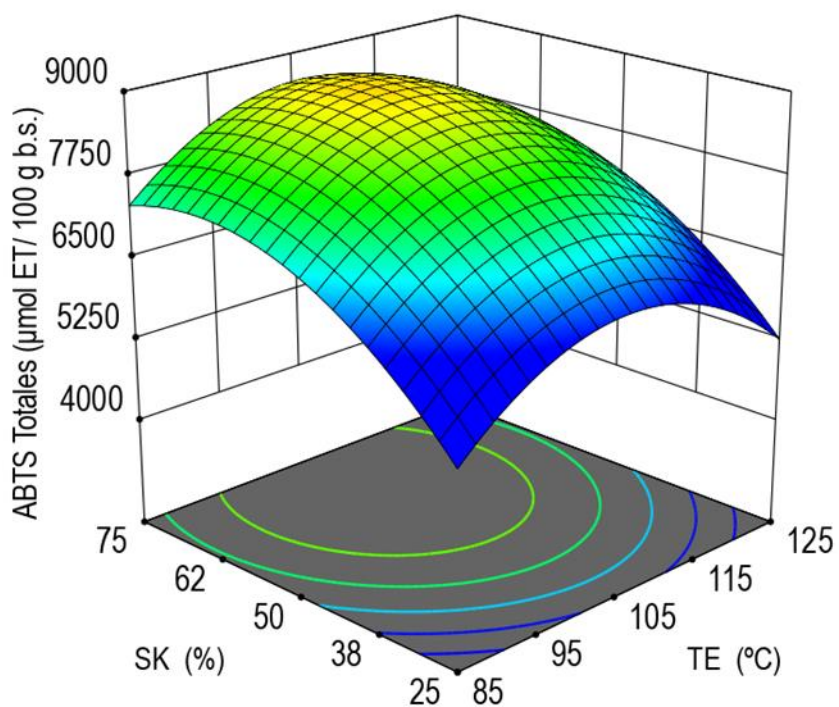


Figura 32. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS totales (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

De igual manera se observa que al momento de aumentar la temperatura, el valor de TABTS aumenta llegando a su punto máximo, y posteriormente disminuye. Esto puede ser debido a que la temperatura liberó los compuestos del sake kasu, permitiendo que el radical ABTS interaccione de mejor manera, hasta llegar a un punto, y disminuir ya que al aumentar la temperatura arriba de 105 °C, el tiempo de residencia de la muestra en el extrusor es menor. Sumado a que los compuestos que ya se encuentran libres pueden perder su propiedad antioxidante. En la **Figura 33** se observa el efecto de TE y VT sobre el contenido de ABTS total, a SK constante (50%). Al igual que en la figura anterior, se observa un punto máximo de TABTS, a condiciones de 105 °C de TE y 110 rpm de VT. Este comportamiento coincide con el efecto de la TE presentado en la **Figura 30**. Asimismo, el incremento de ABTS total al aumentar VT podría deberse al efecto termomecánico producido por el cizallamiento a niveles intermedios de VT liberándose compuestos fenólicos. Sin embargo, mayores niveles de VT podrían haber causado una degradación por mayor daño termomecánico.

g. Actividad antioxidante libre por el método de DPPH

El ensayo DPPH es un método utilizado ampliamente para determinar la capacidad antioxidante de extractos alimenticios. Tiene como característica determinar la actividad antioxidante de compuestos liposolubles o solventes orgánicos (Munteanu & Apetrei, 2021). El fundamento de la técnica se basa en la reducción del radical de la misma molécula, la cual es proporcional a la concentración de compuestos antioxidantes, cambiando de color púrpura a amarillo (Brand-Williams y col., 1995).

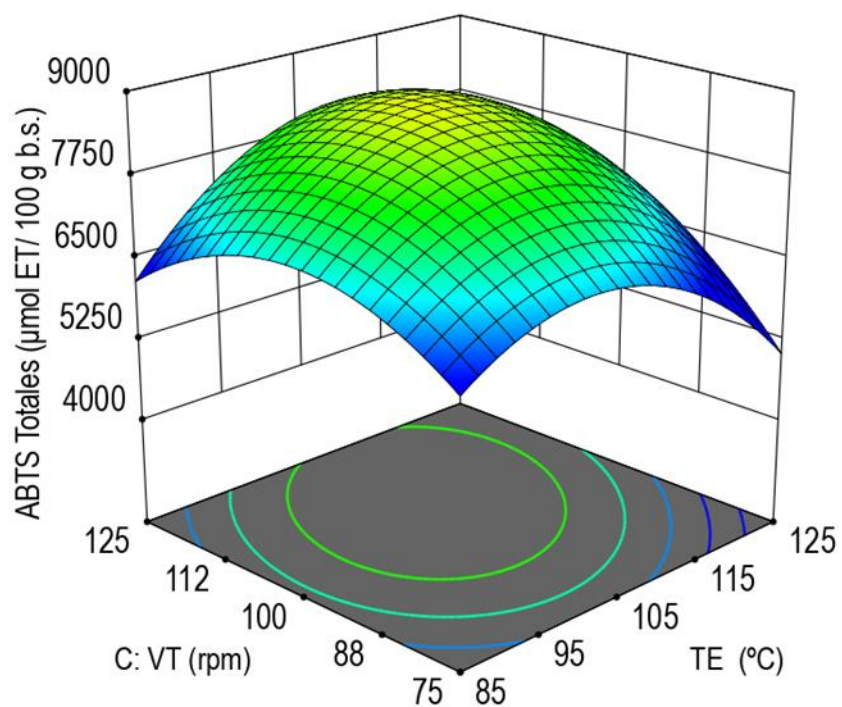


Figura 33. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante por ABTS totales (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

En la **Figura 34** se observa el comportamiento de la actividad antioxidante por DPPH libre en función del contenido de SK y la TE, manteniendo la VT constante en 100 rpm. Se muestra que al momento de aumentar el contenido de sake kasu, aumenta el valor de DPPH libre, llegando hasta un punto máximo de 81 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g b.s.}$ Este comportamiento puede ser debido al elevado contenido de compuestos bioactivos presentes en sake kasu, entre los cuales se incluye compuestos fenólicos, péptidos y aminoácidos aromáticos generados en los procesos fermentativos (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019; Motono y col., 2021).

En la **Figura 35** se muestra el efecto de la VT y la TE sobre la actividad antioxidante por DPPH libre, a SK constante (50%). Se observa que los valores más altos se encontraron a TE alta y VT bajo. Esto puede ser debido a que al aumentar la TE y bajar la VT, los compuestos fenólicos que se encuentran en la matriz polimérica son hidrolizados y se liberan sin provocar su degradación (Moraru & Kokini, 2003). Por otro lado, al aumentar la VT por encima de 130 rpm o la TE por encima de 115 °C, se observó una disminución en los valores de DPPH libre, lo cual puede deberse a que altas velocidades de tornillo generan un mayor cizallamiento y fricción dentro del extrusor, incrementando la temperatura local y provocando la degradación de los compuestos antioxidantes (Neder-Suárez y col., 2021).

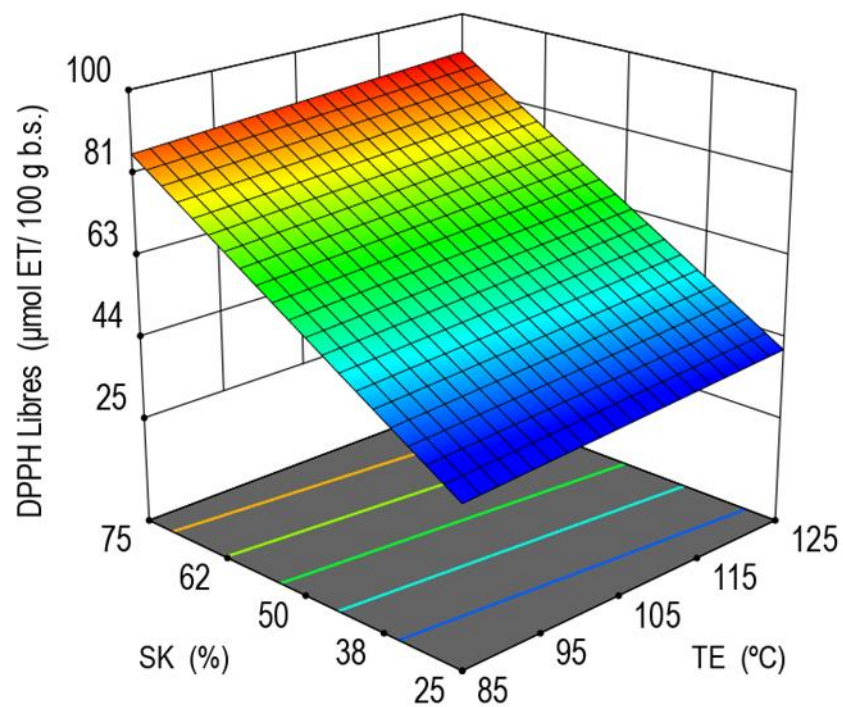


Figura 34. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH libre (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

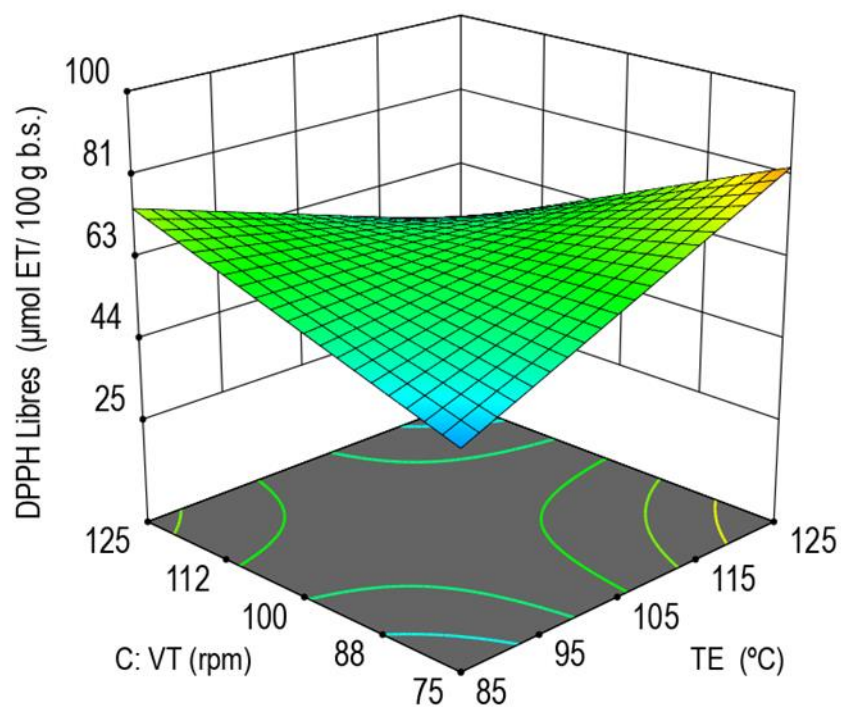


Figura 35. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH libre (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

h. Actividad antioxidante ligado por el método de DPPH

La fracción ligada corresponde a los compuestos que se encuentran unidos covalentemente a componentes estructurales de la matriz alimentaria, como polisacáridos de la pared celular, fibra dietética o proteínas (Adom & Liu, 2002). A diferencia de la fracción libre, estos compuestos no pueden ser extraídos directamente con solventes orgánicos y requieren de un proceso de hidrólisis alcalina para romper los enlaces éster o éter que los mantienen unidos a la matriz (Mora-Rochin y col., 2010). La evaluación de la capacidad antioxidante de esta fracción es de particular relevancia, ya que estos compuestos pueden ser liberados durante la digestión gastrointestinal, contribuyendo significativamente al efecto antioxidante total del alimento después de su consumo (De la Parra y col., 2007). En la **Figura 36** se presenta el comportamiento de la actividad antioxidante por DPPH ligado en función del contenido de SK y la TE, manteniendo la VT constante (100 rpm). Los mayores valores de DPPH ligado ($> 520 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g b.s.}$) se obtuvieron a altos contenidos de SK ($> 75 \%$) a TE alto. Este comportamiento puede atribuirse al elevado contenido de compuestos antioxidantes presentes en el sake kasu, incluyendo compuestos fenólicos y péptidos, que permanecen ligados a la matriz después de la extracción de la fracción libre y requieren hidrólisis para ser liberados (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). Adicionalmente, las proteínas del sake kasu contienen aminoácidos aromáticos (tirosina, triptófano y fenilalanina) que, al momento de aumentar la temperatura de extrusión, se vuelven biodisponibles, contribuyendo significativamente a la capacidad antioxidante medida por el método DPPH, mediante la capacidad de sus anillos aromáticos para estabilizar radicales libres (Singleton y col., 1999; Kawakami y col., 2017).

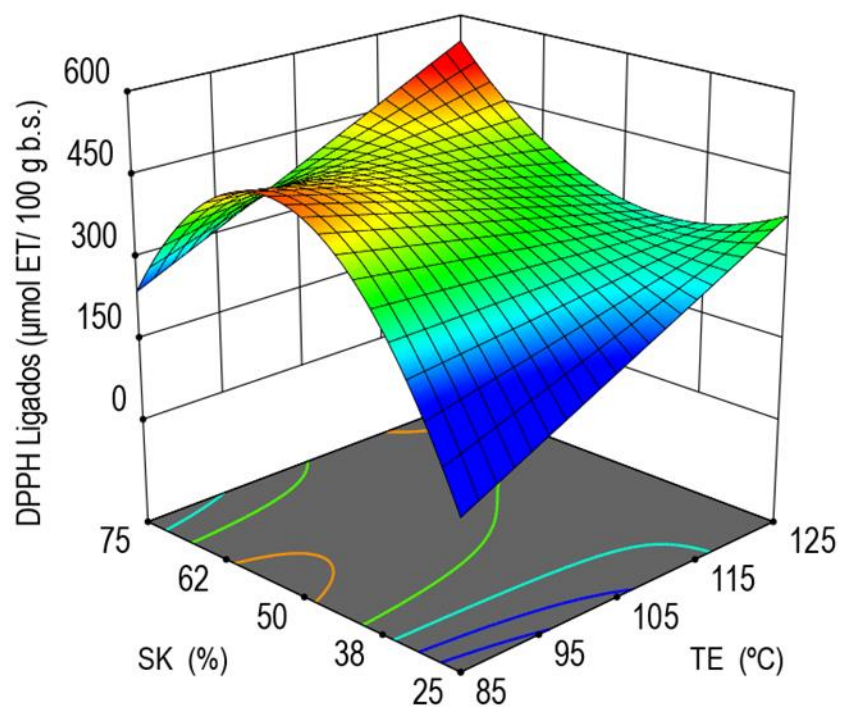


Figura 36. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH ligados (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu

Por otro lado, al aumentar la TE por encima de 115 °C combinada con altos contenidos de SK, se observó una ligera disminución en los valores de DPPH ligado, lo cual puede deberse a la degradación térmica de los compuestos antioxidantes o a modificaciones estructurales que afectan su liberación durante la hidrólisis alcalina (Yamashita y col., 2020). A bajos contenidos de SK (< 15 %), los valores de DPPH ligado fueron considerablemente menores, independientemente de la TE utilizada, reflejando el menor aporte de compuestos bioactivos por parte del arroz en comparación con el sake kasu.

En la **Figura 37** se presenta el efecto de la VT y la TE sobre la actividad antioxidante por DPPH ligado, manteniendo el contenido de SK constante en 50 %. Se observa un punto máximo de actividad antioxidante a bajas TE y bajas VT. Al incrementar la TE, el valor de DPPH disminuyó, alcanzando su punto mínimo a 125 °C, independientemente de la VT utilizada. Este comportamiento puede atribuirse a que las bajas temperaturas de extrusión no generan suficiente energía térmica como para causar una degradación significativa de los compuestos antioxidantes ligados, permitiendo su conservación en la matriz y su posterior liberación durante la hidrólisis alcalina (Neder-Suárez y col., 2021). Asimismo, las bajas VT reducen el cizallamiento y la fricción dentro del extrusor, lo que limita el daño mecánico sobre los compuestos bioactivos y favorece su retención en la fracción ligada (Moraru & Kokini, 2003). Por el contrario, al incrementar la TE por encima de 125 °C, el valor de DPPH ligado disminuye drásticamente, lo cual puede deberse a la degradación térmica de los compuestos antioxidantes o a modificaciones estructurales de la matriz que afectan su posterior liberación durante la hidrólisis (Yamashita y col., 2020).

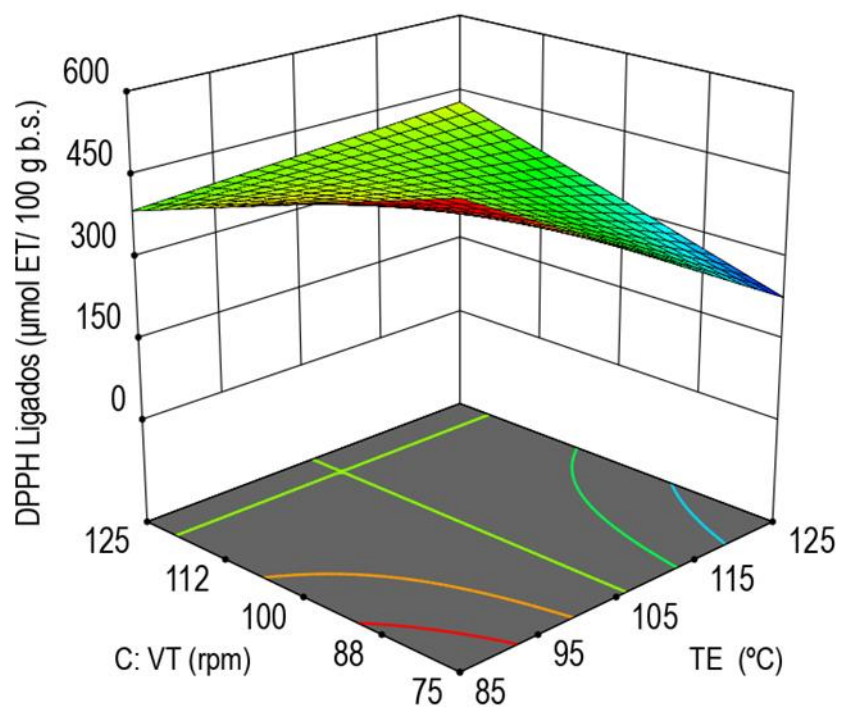


Figura 37. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH ligados (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Este comportamiento sugiere que las altas temperaturas de extrusión tienen un efecto negativo sobre la capacidad antioxidante de los compuestos ligados, probablemente por la desnaturalización de proteínas o la degradación de compuestos fenólicos termolábiles presentes en el sake kasu (Kawakamiy col., 2017; Izu y col., 2019).

i. Actividad antioxidante total por el método de DPPH

En la **Figura 38** se presenta el comportamiento de la actividad antioxidante por DPPH total en función del contenido de SK y la TE, manteniendo la VT constante (100 rpm). El punto más alto de actividad antioxidante se localiza a altas TE (> 115 °C) y altos contenidos de SK (75 %), alcanzando valores superiores a 600 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g b.s.}$ Este comportamiento puede ser debido a la desnaturalización de las proteínas presentes en el sake kasu durante la extrusión a altas temperaturas, ya que puede genera la liberación de péptidos con capacidad antioxidante (Kawakami y col., 2017; Motono y col., 2021). Adicionalmente, el sake kasu es una fuente importante de compuestos fenólicos y aminoácidos aromáticos (tirosina, triptófano y fenilalanina) que contribuyen significativamente a la actividad antioxidante total (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). Las altas temperaturas favorecen la ruptura de enlaces que mantienen a los compuestos fenólicos ligados a la pared celular, incrementando su extractabilidad y, por ende, la capacidad antioxidante medida (Mora-Rochin y col., 2010; De la Parra y col., 2007). Asimismo, durante el procesamiento térmico pueden generarse productos de la reacción de Maillard con actividad antioxidante, los cuales contribuyen al incremento de los valores de DPPH total en condiciones de alta temperatura (Yamashita y col., 2020).

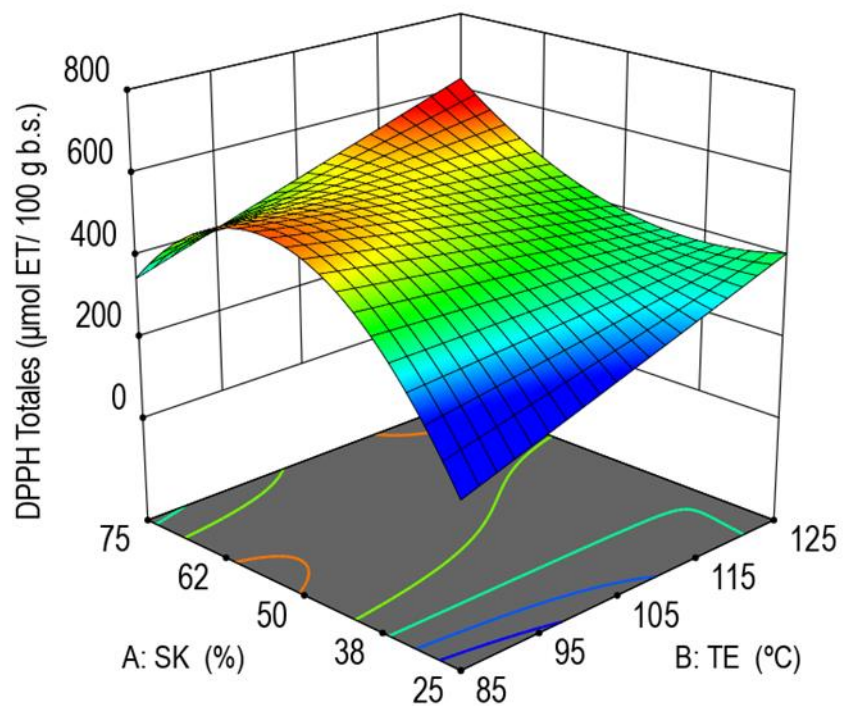


Figura 38. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH totales (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Por otro lado, a bajos contenidos de SK, los valores de DPPH total fueron considerablemente menores, independientemente de la TE utilizada, reflejando el menor aporte de compuestos bioactivos por parte del arroz en comparación con el sake kasu.

En la **Figura 39** se presenta el efecto de la VT y la TE sobre la actividad antioxidante por DPPH total, manteniendo el contenido de SK constante (50%). Se observa un punto máximo de actividad antioxidante a bajas TE y bajas VT. Al incrementar la TE, el valor de DPPH disminuyó, alcanzando su punto mínimo a 125 °C, independientemente de la VT utilizada. Este comportamiento puede atribuirse a que las bajas temperaturas de extrusión no generan suficiente energía térmica como para causar una degradación significativa de los compuestos antioxidantes, permitiendo su conservación en la matriz (Neder-Suárez y col., 2021). Asimismo, las bajas VT reducen el cizallamiento y la fricción dentro del extrusor, lo que limita el daño mecánico sobre los compuestos bioactivos y favorece su retención (Moraru & Kokini, 2003). Por el contrario, al incrementar la TE por encima de 125 °C, el valor de DPPH total disminuye drásticamente, lo cual puede deberse a la degradación térmica de los compuestos antioxidantes, incluyendo compuestos fenólicos y péptidos, así como a la posible destrucción de los productos de la reacción de Maillard que contribuyen a la capacidad antioxidante (Yamashita y col., 2020; Kawakami y col., 2017). Este comportamiento sugiere que las altas temperaturas de extrusión tienen un efecto negativo sobre la capacidad antioxidante total, probablemente por la desnaturalización excesiva de proteínas o la degradación de compuestos fenólicos termolábiles presentes en el sake kasu (Izu y col., 2019).

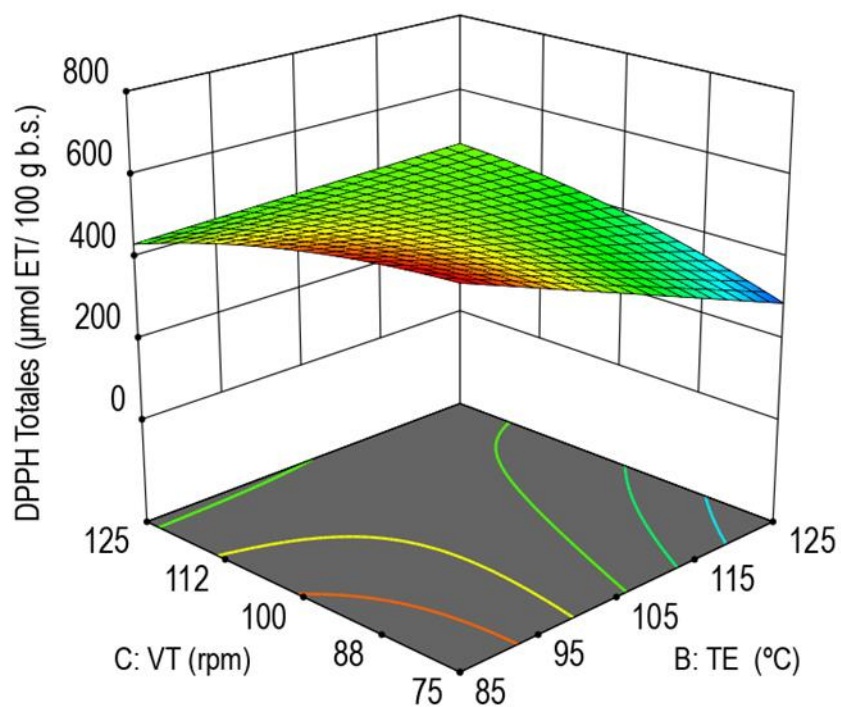


Figura 39. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la actividad antioxidante DPPH totales (mg ET/100 g b.s.) de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

5. Análisis sensorial

a. Color

Dentro de los atributos sensoriales más importantes, se encuentra el color, ya que forma parte y contribuye en gran medida a la primera impresión del consumidor sobre el producto. Este aspecto puede definir si un alimento es un éxito comercial o un fracaso. Esto influye de igual manera en la percepción de otros atributos como el sabor o la textura (Serna-Saldívar, 2022). Específicamente en pastas alimenticias, el color se puede asociar con la calidad percibida por el consumidor, esperando tonalidades amarillo-doradas brillantes, similares a las pastas elaboradas con sémola de trigo, o blancas como las pastas o fideos de arroz (Delgado-Murillo y col., 2024). Este parámetro puede ser modificado tanto por las materias primas utilizadas, al igual que las condiciones de procesamiento, pudiéndose generar compuestos que induzcan pardeamiento como reacciones de Maillard, o la modificación de la estructura superficial de los productos (Nishidono y col., 2024).

En la **Figura 40** se observa el efecto del contenido de SK y la TE sobre la percepción de color de las pastas, manteniendo la VT constante (100 rpm). Los valores más altos de aceptabilidad del color se presentaron en dos zonas: a bajos contenidos de SK y altas TE, y a altos contenidos de SK combinados con alta TE.

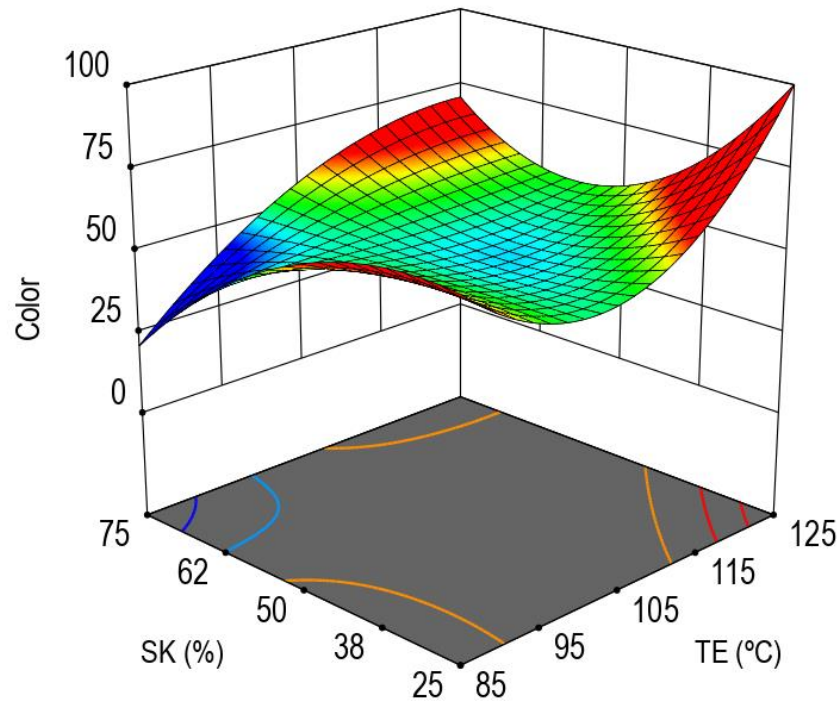


Figura 40. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de color de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

En el primer caso, el aumento puede ser debido a dos razones: el color del producto (al contener poco SK) es similar al de la pasta de trigo, sumado a que, a condiciones altas de procesamiento, la estabilidad de la matriz es mayor, generando una mejor gelatinización del almidón, formando una matriz con mayor estabilidad, impidiendo la pérdida de sólidos resultando en una pasta brillante y agradable al ojo del consumidor (Serna-Saldívar, 2022). El segundo caso se explica de la misma manera, al tener una temperatura alta, puede favorecer la formación de una superficie uniforme en la pasta, generando un color brillante y apetecible para el consumidor, sin importar las tonalidades que brinda el sake kasu (Tsutsui y col., 1998; Nishidono y col., 2024). Por el contrario, a bajos contenidos de SK y bajas TE, la percepción del color disminuye considerablemente. Este comportamiento puede deberse a que en estas condiciones la pasta no presenta una estructura íntegra, desmoronándose fácilmente, y su superficie presenta un acabado mate, opaco y poco brillante, lo cual resulta poco atractivo para el consumidor (Izu y col., 2019).

En la **Figura 41** se muestra el efecto de la VT y la TE sobre la percepción de color, manteniendo SK constante (50 %). Los mayores valores encontrados para la variable de respuesta se encontraron en 2 zonas: la primera a bajas TE y altas VT, y la segunda a altas TE y bajas VT. Este comportamiento puede ser debido a las condiciones extremas de procesamiento (ya sea alta temperatura o alta velocidad de tornillo). Estas condiciones de procesamiento favorecen la integridad estructural de la pasta, generando una superficie más homogénea y brillante, lo que mejora la percepción visual del producto por parte de los panelistas (Moraru & Kokini, 2003).

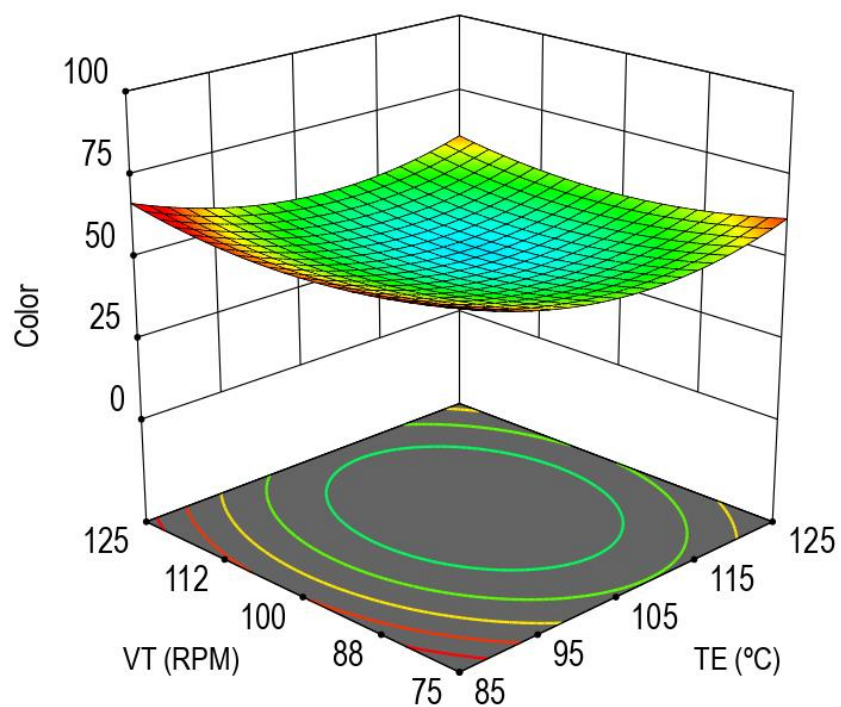


Figura 41. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de color de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

b. Sabor

El sabor es uno de los atributos sensoriales que determina principalmente si un alimento tendrá éxito comercial o no. Esto debido a que influye directamente en la experiencia de consumo y la decisión de seguir comprando un producto (Serna-Saldivar, 2022). En el caso de las pastas alimenticias, el sabor está fuertemente influenciado por la materia prima que la compone, así como las condiciones de procesamiento durante la extrusión, las cuales pueden generar distinto tipo de modificaciones química y estructurales, contribuyendo al perfil sensorial de los productos (Mikami y col., 2020; Nishidono y col., 2024).

En la **Figura 42** se presenta el efecto del contenido de SK y la TE sobre la percepción de sabor de las pastas alimenticias, manteniendo la VT constante (100 rpm). Se puede observar que los valores más altos se obtuvieron a altas TE combinadas con alto contenido de SK, y a bajo SK en todo el rango de TE. Este comportamiento puede ser debido a que el SK por naturaleza, contiene un alto porcentaje de proteína que pueden dar un sabor amargo en el producto (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). Si esta materia prima es combinada o sometida a altas temperatura de procesamiento durante la extrusión, las proteínas comienzan a desnaturalizarse e hidrolizarse parcialmente, generando péptidos de bajo peso molecular y aminoácidos, que pueden contribuir a sabores menos desagradables, como el umami, y reducir la percepción del amargor (Kawakami y col., 2017; Motono y col., 2021). Por el contrario, a bajas TE ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) combinadas con altos contenidos de SK ($> 25\%$), la percepción del sabor disminuye considerablemente.

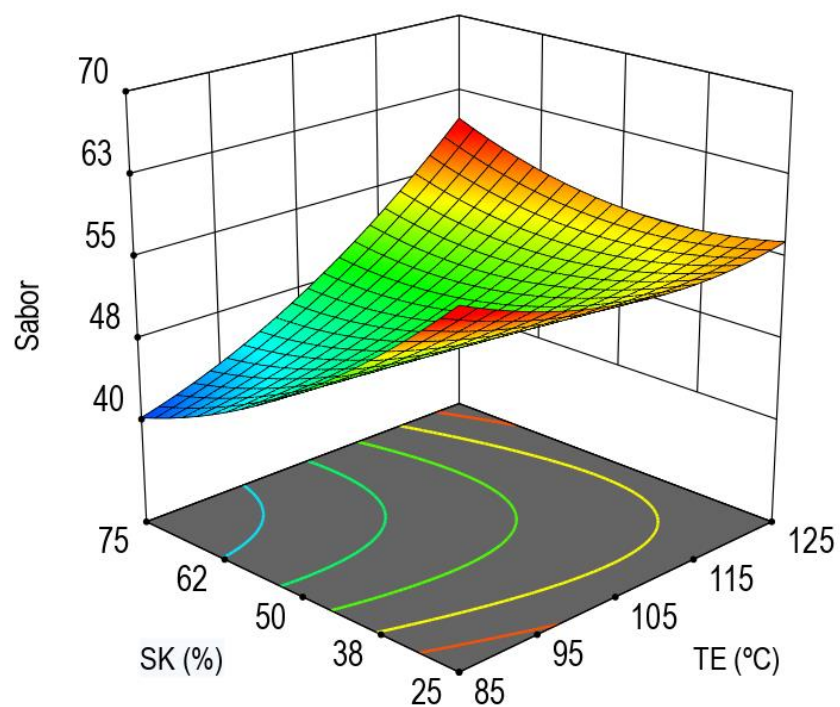


Figura 42. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de sabor de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu

En estas condiciones, las proteínas no se desnaturalizan adecuadamente y el sabor amargo característico del sake kasu permanece, resultando menos aceptable para los panelistas. A bajos contenidos de SK, independientemente de la TE, los valores de aceptabilidad del sabor fueron intermedios, reflejando el menor aporte de compuestos del sake kasu y una mayor influencia del sabor neutro del arroz.

En la **Figura 43** se muestra el efecto de la VT y la TE sobre la percepción de sabor, manteniendo SK constante (50%). Se observan 2 puntos máximos de sabor: a altas TE y VT, y a bajas VT y bajas TE. El primer punto puede ser debido a que las condiciones seberas de procesamiento provocan la desnaturalización de proteínas presentes en el sake kasu, disminuyendo el sabor amargo de las pastas, sumando que estas condiciones pueden generar la gelatinización del almidón, mejorando la percepción del sabor por parte del consumidor (Neder-Suárez et al., 2021). El aumento en la percepción de sabor a bajas condiciones de TE y VT puede ser debido a que en estas condiciones la viscosidad de la materia prima aumenta, teniendo más resistencia para fluir, aumentando el esfuerzo de cizalla, provocando mayor absorción de energía sobre la materia prima.

c. Textura

La textura en los alimentos, en especial para las pastas alimenticias, es uno de los atributos sensoriales más críticos de la aceptabilidad para el consumidor, ya que influye directamente en la experiencia y en la percepción de la calidad del producto (Serna-Saldívar, 2022).

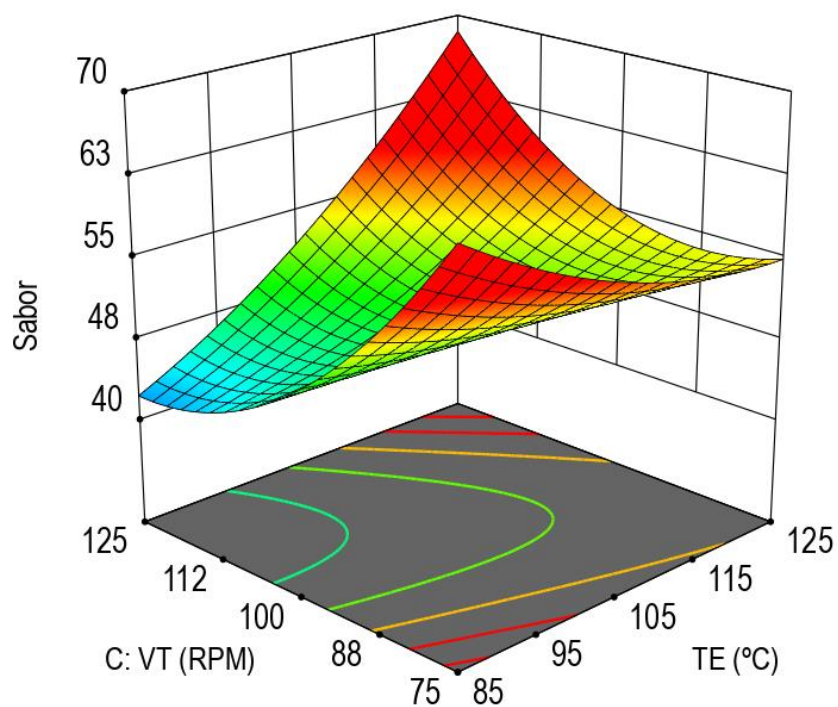


Figura 43. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de sabor de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Específicamente, en pastas extrudidas, la textura está determinada principalmente por la matriz de almidón y su interacción con otros compuestos como las proteínas y las fibras (Moraru & Kokini, 2003). La formación de una matriz de almidón estable es esencial para generar una pasta que mantenga su integridad durante la cocción y proporcione una textura firme pero agradable al consumidor (Neder-Suárez y col., 2021).

En la **Figura 44** se muestra el efecto del contenido de SK y la TE sobre la percepción de textura de las pastas, manteniendo la VT constante (100 rpm). Los mayores valores de aceptabilidad textural (> 70 en la escala LAM) se obtuvieron a altas TE (> 115 °C) a dos puntos de SK (a altos y a bajos contenidos), disminuyendo a medida que la temperatura de extrusión bajaba. Este comportamiento puede ser debido a que a bajas temperaturas de extrusión la presencia de SK compromete la integridad de la estructura de las pastas, debido a que es un subproducto de un material ya procesado y fermentado que contiene una alta proporción de sólidos solubles, proteínas y fibra, que pueden interrumpir la red de almidón (Tsutsui y col., 1998; Izu y col., 2019). Al incrementarse la TE, esta situación se corrige, ya que las altas temperaturas de extrusión permiten una mayor gelatinización del almidón, permitiendo una mejor integración de los componentes del SK a la matriz, ayudando a que se genere una textura mejor, firme y agradable (Moraru & Kokini, 2003; Neder-Suárez y col., 2021).

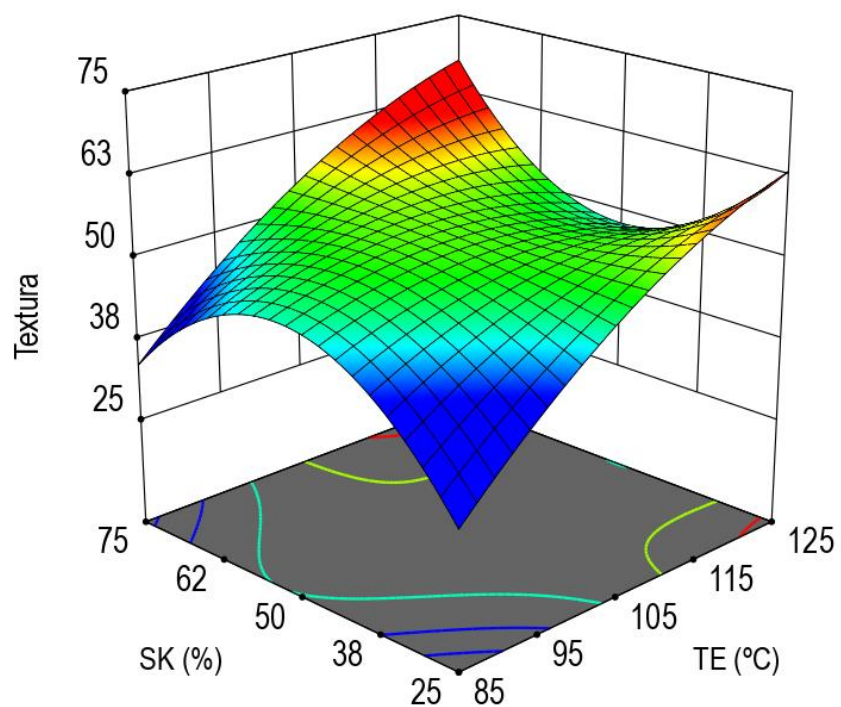


Figura 44. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de textura de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

En la **Figura 45** se muestra el efecto de la VT y la TE sobre la textura, manteniendo SK constante (50 %). Los mayores valores de textura se presentaron a bajas VT y a valores intermedios de TE, disminuyendo al momento de aumentar la VT. Este comportamiento puede ser debido a que a altas VT generan un mayor esfuerzo de cizalla dentro del extrusor, lo que genera hidrólisis parcial de compuestos y por ende una pérdida de sólidos en la matriz (Moraru & Kokini, 2003). De igual manera a bajar temperatura de extrusión, los gránulos de almidón no se gelatinizan completamente. Al momento de aumentar la temperatura, el valor de textura aumenta hasta un punto máximo y posteriormente disminuya. Esto puede ser debido a que, al aumentar la temperatura, los componentes de la matriz pueden ser hidrolizados por la temperatura de extrusión, generándose componentes más pequeños, afectando en la textura (Neder-Suárez y col., 2021).

d. Aceptabilidad general (AG)

La aceptabilidad sensorial de alimentos de consumo masivo producidos a partir de nuevos ingredientes es de alta importancia, permitiendo conocer la opinión de los consumidores acerca de las propiedades de los productos (Zegarra y col., 2019). En la **Figura 46** se muestra el efecto de la SK y TE sobre la AG a VT constante (100 rpm). Se puede observar una disminución de AG a bajos TE y altos HSK. La disminución de AG a altos HSK puede deberse a que el saka kasu posee un sabor amargo, que está relacionado con su contenido de proteínas. Algunos reportes muestran que las proteínas pueden generar sabor amargo en su forma nativa, disminuyendo al momento de ser sometida temperaturas altas provocando su desnaturalización (Davis and Williams, 1998).

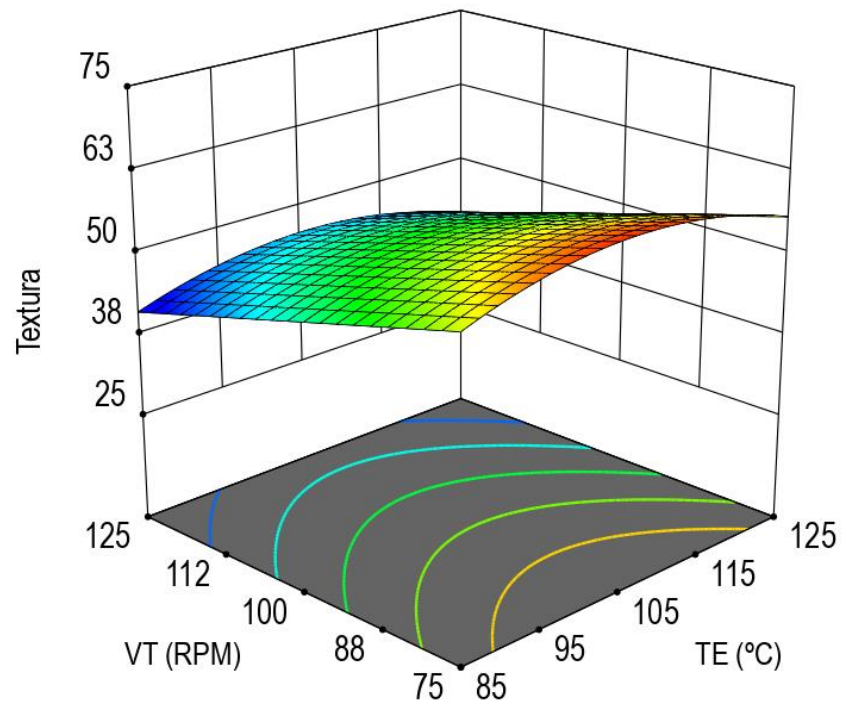


Figura 45. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la percepción de textura de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu

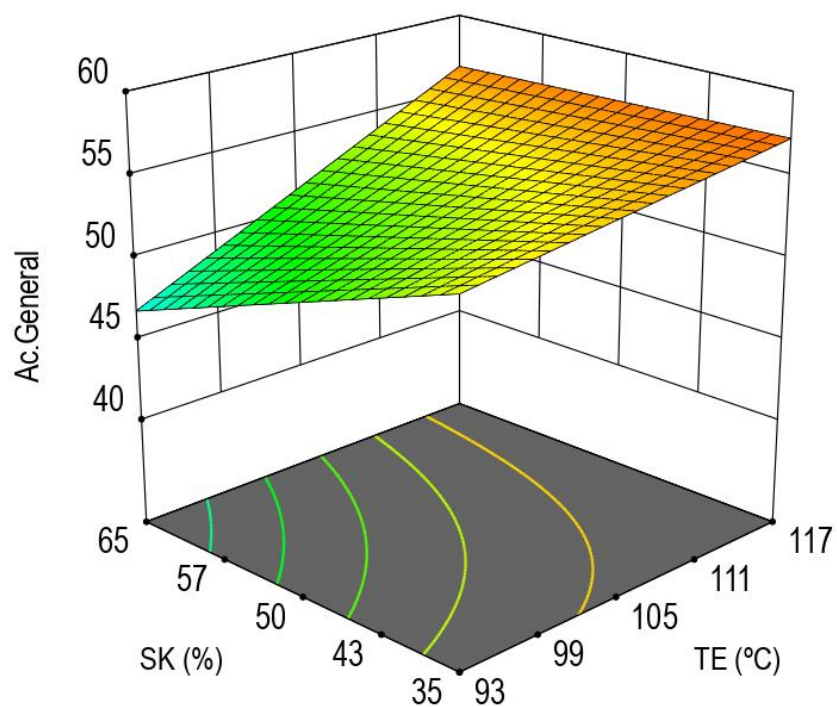


Figura 46. Efecto del contenido de sake kasu (SK) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la aceptabilidad sensorial de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

Aunado a esto, al aumentar del sake kasu en la mezcla pudo generar una disminución en la severidad del proceso de extrusión, reduciendo el tiempo de residencia y la cocción del material (Marti y col., 2010).

En la **Figura 47** se muestra el efecto de la TE y la VT sobre la AG de las pastas alimenticias, a HSK constante (50%), donde pueden observarse los mayores valores fueron obtenidos al combinando altas TE y VT. Esto pudo deberse a que altas TE combinadas con altas VT pudieron mejorar la textura y gelatinización del almidón, siendo más agradable para el consumidor. Asimismo, a altas TE, y VT, las proteínas del material pudieron ser desnaturalizadas, perdiendo su sabor amargo en este proceso (Padalino y col., 2015).

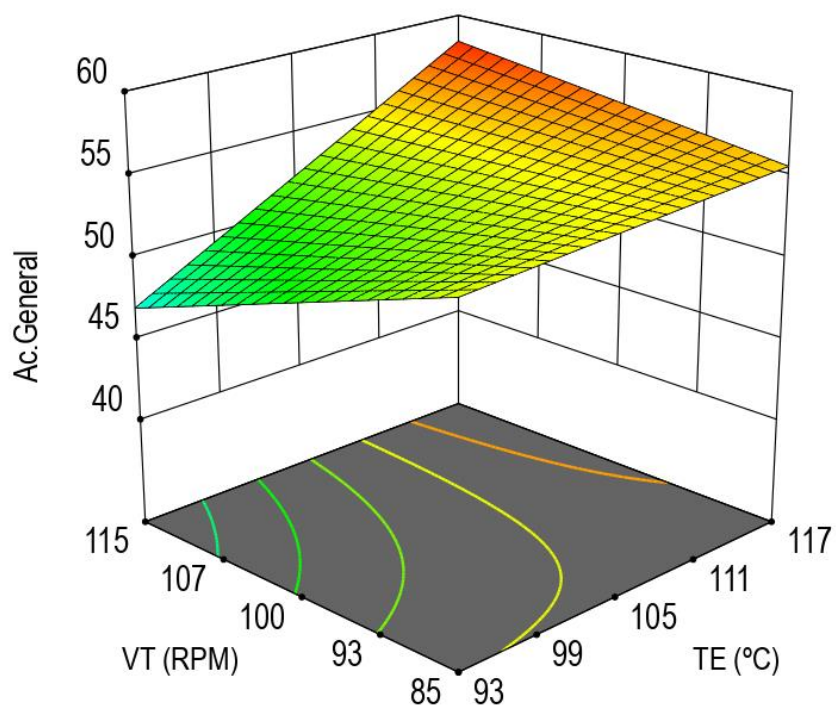


Figura 47. Efecto de la velocidad de tornillo (VT) y la temperatura de extrusión (TE) sobre la aceptabilidad sensorial de las pastas extrudidas adicionadas con sake kasu.

C. Optimización del proceso

El proceso de optimización fue llevado a cabo para encontrar las condiciones ideales de procesamiento que permitieran obtener la pasta con las mejores propiedades fisicoquímicas, nutricionales, funcionales y sensoriales. Para lograr esto, los criterios utilizados fueron obtener los valores más altos de PRO, CFT, ABTS, AG, y los valores más bajos de PSC (**Cuadro 9**). Se desean los valores más altos para PRO debido a que se pretende una pasta con mejor valor nutricional, asimismo, altos valores de CFT y ABTS están relacionados con la reducción de la incidencia de diferentes enfermedades (Martins y col. 2016), mientras que se desean altos valores de AG, ya que es importante que productos de consumo masivo como las pastas tengan buena aceptabilidad por los consumidores. Asimismo, se desean bajos valores de PSC, ya que se desea que las pastas mantengan su integridad cuando son sometidas al proceso de cocción (Delgado-Murillo y col. 2024). Las condiciones óptimas de procesamiento generadas por el modelo fueron: SK de 60.83%, TE de 116.89 °C y VT de 107.93 rpm. Los valores predichos por el diseño experimental fueron: PRO de $13.18 \pm 0.28\%$, PSC de $6.89 \pm 0.36\%$, CFT de 376.11 ± 18.55 mg EAG/100 g d.b., ABTS total de 8691.89 ± 381.13 μ mol ET/100 g d.b. y AG de 57.47 (Cuadro 9). Estos valores fueron validados de forma experimental, encontrando para PRO de $13.76 \pm 0.60\%$, CFT de 380.83 ± 14.40 mg EAG/100 g d.b. de muestra base seca, ABTS total de 7631.70 ± 721.13 μ mol ET/100 g d.b. de muestra base seca, AG de 60.2 ± 2.91 y PSC de $7.15 \pm 0.17\%$, presentándose valores muy similares a los predichos por los modelos, demostrando que los modelos obtenidos por el diseño experimental fueron adecuados. En la **Figura 48** se muestra el valor de la deseabilidad individual para

cada una de las variables de respuesta, al igual que la deseabilidad combinada que fue de 0.732, siendo este un valor aceptable para la optimización (Fabila-Carrera, 1998).

Cuadro 9. Resultados de las variables de respuesta utilizadas en la optimización del proceso de extrusión: valores predichos y los valores

Optimización	PRO	PSC	CFT	ABTS	AG
Valores predichos	13.2±0.3	6.9±0.4	376±18.55	8692±381.13	57.5±1.8
Valores experimentales	13.8±0.6	7.2±0.2	380±14.40	7632±721.13	59.4±4.6

experimentales.

PRO: proteína, PSC; Pérdida de sólidos por cocción; CFT: compuestos fenólicos totales; ABTS: actividad antioxidante por el método ABTS; AG: aceptabilidad general.

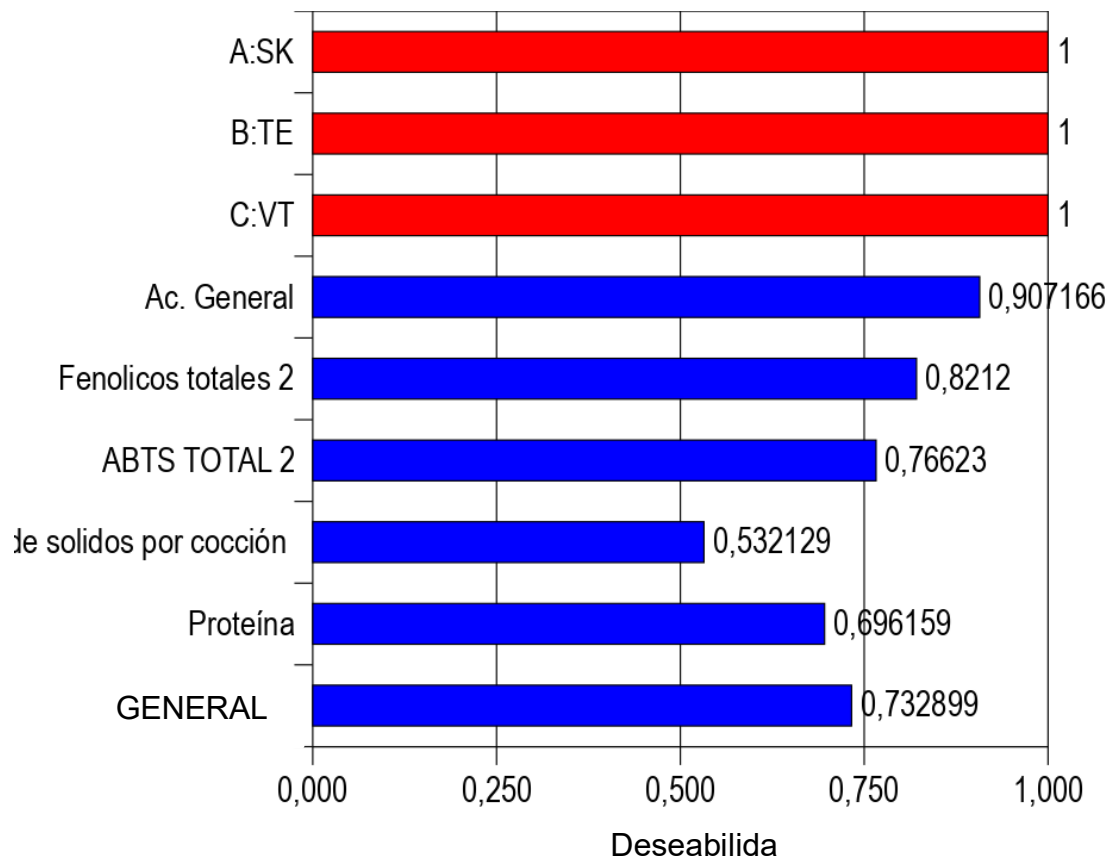


Figura 48. Deseabilidad de cada una de las variables de respuesta y deseabilidad general de la optimización numérica.

D. Actividad biológica

2. Efecto hipocolesterolémico

El colesterol es uno de los principales marcadores de riesgo cardiovascular presente, y la evaluación de su alteración está asociada con el desarrollo de enfermedades como la aterosclerosis y el hipercolesterolémia (Grundy y col., 2019). En el **Cuadro 10** se muestra el resultado de los tratamientos sobre el colesterol total. El grupo DAG (dieta alta en grasa) presentó el valor más alto de colesterol total (142.5 ± 17.5 mg/dL. Esto se compara con el grupo sano, ya que el valor de todos los ratones no superó el umbral de medición del equipo que es mayor a 100 mg/dL, Siendo los de DAG mayor. Esto confirma la efectividad del modelo utilizado para generar el hipercolesterolémia inducido por dieta (Kubo y col., 2017; Yamashita y col., 2020). El tratamiento con colestiramina (MED) redujo el valor del colesterol total a 124.0 ± 21.6 mg/dL y ningún individuo se presentó por debajo del umbral de medición. Sin embargo, no se encontró diferencia con el control DAG. Esta ineficacia del medicamento puede ser debida a que la dosis utilizada para el presente estudio no fue lo suficiente grande y no fue aplicada el suficiente tiempo para ver un efecto significativo. Distintos autores y médicos en general recomiendan el no usarlo ya que su dosis no es exacta y mencionan que generalmente depende del paciente, optando por otros medicamentos como los inhibidores de la ruta de generación de colesterol.

Cuadro 10. Efecto de los diferentes tratamientos con pasta optimizada sobre los niveles de colesterol total, HDL, triglicéridos y glucosa en ratones Balb/c con dieta alta en grasa.

Tratamiento	Colesterol total		HDL		Triglicéridos	Glucosa
	(mg/dL)		(mg/dL)		(mg/dL)	(mg/dL)
	Q1 (<100)*	Q2(100-200)**	Q1 (100>)***	Q2 (0-100)****		
SANO	8	-	-	54.8±16.2 ^d	115.3±8.4 ^a	108.2±9.7 ^c
DAG	0	142.5±17.5 ^a	2	88.2±07.6 ^a	129.5±21.7 ^a	135.7±10.3 ^a
MED	0	124.0±21.6 ^{ab}	5	84.7±10.9 ^{abc}	119.3±20.6 ^{ab}	125.1±8.5 ^b
T1	2	117.0±11.0 ^b	3	87.0±10.1 ^{ab}	100.0±20.9 ^{bc}	105.0±7.5 ^c
T2	6	109.5±07.8 ^b	2	71.8±07.5 ^{bc}	101.5±11.3 ^{bc}	98.2±10.4 ^c
T3	6	108.0±09.9 ^b	0	68.7±12.0 ^c	98.3±12.3 ^c	98.8±11.7 ^c

SANO: control sano con dieta normal; DAG: tratamiento con dieta alta en grasa; MED: tratamiento con medicamento colestiramina; T1: tratamiento equivalente a 50% de la fibra diaria recomendada; T2: tratamiento equivalente al 100% de la fibra diaria recomendada; T3: tratamiento equivalente a 200% de la fibra diaria recomendada.

*Primer cuartil se reporta la moda o número de individuos por debajo de 100 mg/dL.

**Segundo cuartil se reporta la media, DE y comparación de medias por el método de Fisher (95% de confianza).

***Primer cuartil se reporta la moda o número de individuos por arriba de 100 mg/dL.

****Segundo cuartil se reporta la media, DE y comparación de medias por el método de Fisher (95% de confianza).

Por su parte, los tratamientos con la pasta óptima de SK (T1, T2 y T3) mostraron una reducción dependiente de la dosis administrada en los niveles de colesterol total (117.0 ± 11.0 , 109.5 ± 7.8 y 107.2 ± 12.8 mg/dL, respectivamente), siendo el T3 (equivalente al 200% de la fibra diaria recomendada) el que presentó el valor más bajo, con 6 individuos de 8 por debajo de 100 mg/dL y muy cercano al valor del sano. Este comportamiento puede atribuirse a la cantidad de fibra dietaria presente en la pasta de sake kasu. La fibra dietaria se mezcla con las sales biliares generada por el hígado y depositándose en la luz del duodeno impidiendo su reabsorción en el intestino delgado, obligando al hígado a tomar colesterol del torrente sanguíneo para sintetizar nuevos ácidos biliares, lo que resulta en una disminución en el colesterol sérico (Tsutsui y col., 1998; Brown y col., 1999).

En relación con los niveles de HDL, el cual es considerado el “colesterol bueno” por su función en el torrente sanguíneo, el grupo SANO presentó los valores más pequeños con 54.8 ± 16.2 mg/dL, y el más alto lo presentó el tratamiento DAG. Aunque parezca contradictorio, este valor puede ser esperado, ya que se mantiene una relación entre el colesterol HDL y el colesterol total, al ser más alto el colesterol de DAG, la proporción puede generar un riesgo aterogénico. Se observa que los valores de HDL fueron disminuyendo (87.0 ± 10.1 , $3 > 100$; 71.8 ± 07.5 , $2 > 100$; 68.7 ± 12.0 , $1 > 100$ Respectivamente) a medida que el tratamiento aumentaba su concentración (T1, T2 y T3), siendo el menor el T3. Este efecto puede ser debido a la disminución en general del colesterol total, el cual engloba el colesterol HDL, LDL, triglicéridos entre otros, mostrando su efectividad en la disminución del mismo (Jenkins y col., 2002; Brown y col., 1999).

3. Efecto hipotriglicémico

La medición de triglicéridos en sangre es otro marcador importante en el perfil lipídico. Este dato mostró comportamiento similar al colesterol total. El grupo DAG es el que mostró (**Cuadro 10**) el valor más alto con 129.5 ± 21.7 mg/dL, siendo mayor significativamente al grupo control SANO con 115.3 ± 8.4 mg/dL. El tratamiento MED redujo el valor a 129.5 ± 21.7 mg/dL, pero sin ser significativamente diferente. Sin embargo, los valores de los tratamientos aplicados redujeron de forma significativa el contenido de triglicéridos, siendo el menor el del T3, aun comparado con el control SANO, siendo de 98.3 ± 12.3 mg/dL. Este efecto de la fibra dietaria sobre los triglicéridos es atribuida a la reducción de la absorción de lípidos en los alimentos y la excreción de los mismos (Anderson y col., 2009; Theuwissen & Mensink, 2008).

4. Efecto hipoglucémico

En el **Cuadro 10** se muestra los niveles de glucosa en cada uno de los grupos, observándose una tendencia similar. El grupo DAG presentó en valor más alto de glucosa (135.7 ± 10.3 mg/dL), mientras que el control SANO mostro un valor significativamente menor de 108.2 ± 9.7 mg/dL, el cual es el valor esperado en el presente modelo murino. El tratamiento con colestiramina (MED) presentó glucosa de 125.1 ± 8.5 mg/dL, y los tratamientos con pasta optimizada (T1, T2 y T3) mostraron una disminución dependiente de la dosis (105.0 ± 7.5 , 98.2 ± 10.4 y 98.8 ± 11.7 mg/dL, respectivamente). Este comportamiento puede sugerir que la pasta optimizada no solo presenta un efecto hipolipidémico, sino también hipoglucémico. Esto puede ser debido a que la fibra soluble como los β glucanos presentes en el

sake kasu pueden formar geles viscosos en el tracto digestivo el cual provoca el retraso de la absorción de carbohidratos, reduciendo los picos de glucosa posprandial (Jenkins y col., 2002; Maki y col., 2007). Estos resultados son similares a lo reportado por Tsutsui et al. (1998), quienes observaron que el consumo de fibra proveniente de subproductos de la fermentación puede mejorar tanto el perfil lipídico como el glucémico en modelos animales.

X. CONCLUSIONES

La caracterización química, fisicoquímica, nutricional y funcional de las materias primas demostró que la harina de sake kasu (HSK) presenta un contenido superior de proteína (20.13 %), fibra dietaria total (11.25 %) y compuestos fenólicos, en comparación con la harina de arroz quebrado (HAQ). El perfil de aminoácidos reveló a la lisina como aminoácido limitante en ambos materiales; no obstante, la HSK mostró mejor calidad proteica (C-PER de 2.14) y mayor digestibilidad in vitro (70.71 %), lo que confirma su alto potencial como ingrediente funcional para la industria alimentaria.

El análisis del proceso evidenció que el contenido de sake kasu fue el factor con mayor influencia sobre las propiedades de las pastas, incrementando significativamente el contenido proteico, los compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante (ABTS y DPPH), aunque aumentó las pérdidas de sólidos por cocción y redujo la expansión. De igual manera el incremento de la temperatura y la velocidad de tornillo mejoró las propiedades fisicoquímicas (densidad aparente, tiempo óptimo de cocción) y sensoriales (color, textura y sabor), demostrando que las condiciones de extrusión modulan la calidad final del producto, siendo factible obtener pastas funcionalmente mejoradas y sensorialmente aceptables.

Mediante la metodología de superficie de respuesta se establecieron las condiciones óptimas de procesamiento (60.83 % de SK, 116.89 °C y 107.93 rpm), las cuales fueron validadas experimentalmente al no presentar diferencias significativas con los valores predichos. La pasta óptima obtenida presentó un balance adecuado entre propiedades nutricionales (13.44 % de proteína),

funcionales (380 mg EAG/100 g de compuestos fenólicos totales; 7632 $\mu\text{mol ET}/100$ g de actividad antioxidante ABTS) y sensoriales (aceptabilidad general de 59.4), confirmando la validez y robustez de los modelos matemáticos generados para predecir el comportamiento de las variables de respuesta.

La evaluación del efecto hipocolesterolémico, hipotriglicemiante e hipoglucémico en ratones Balb/c con dieta alta en grasa demostró que el consumo de la pasta optimizada redujo significativamente los niveles de colesterol total, triglicéridos y glucosa en sangre de manera dosis-dependiente. El tratamiento con el 200 % de la fibra dietaria recomendada alcanzó valores muy cercanos al grupo sano, atribuyéndose este efecto a la capacidad de la fibra soluble (β -glucanos) presente en el sake kasu para secuestrar ácidos biliares y reducir la absorción de lípidos y carbohidratos, colocando a esta pasta como una alternativa alimentaria funcional con potencial para contribuir a la prevención de enfermedades cardiovasculares.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- [AMEXIGAPA] Asociación Mexicana de Galletas y Pasta. 2011. Disponible de: <http://amexigapa.org/>. Consultado el 21 de enero de 2013.
- [OMS] Organización mundial de la salud. 2021. Enfermedades cardiovasculares. México. Disponible en: https://www.who.int/es/health-topics/cardiovascular-diseases#tab=tab_1. Consultado el 12 de junio de 2022.
- 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.
- Adom K K, Sorrells M E, Liu R H. 2002. Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 51:7825-7834.
- Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *50*(21), 6182-6187.
- AGHDAMSHAHRIR, H., NAZER, A. & MADZADEH, A. 2006. The effect of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) in replacement fish meal and poultry by product protein in broiler diet XII European Poultry Conference, Verona, Italia.
- Aguilar-Uscanga, B., and J. M. François. 2003. A study of the yeast cell wall composition and structure in response to growth conditions and mode of cultivation. *Lett. Appl. Microbiol.* 37: 268-274.
- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2008). Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering*, *84*(2), 231-242.

- Anderson, J. W., Baird, P., Davis, R. H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., ... & Williams, C. L. (2009). Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, *67*(4), 188-205.
- AOAC International. 2006. Amino acids analysis (Method 982.30 E(a,b,c)). En Official methods of analysis of AOAC International (18^a ed., cap. 45.3.05).
- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL. 19th ed. Association of Official Analytical Chemists The Association. Gaithersburg, Maryland, USA.
- Ashooriha M, Ahmadi R, Ahadi H, Emami S. 2022. Application of kojic acid scaffold in the design of non-tyrosinase enzyme inhibitors. *Chemical Biology & Drug Design*. doi: 10.1111/cbdd.14065.
- Atkinson RW. 1881. The Chemistry of Saké Brewing. Tokyo Daigaku: VintReads. 73 p.
- Ayala-Zavala JF, Vega-Vega V, Rosas-Dominguez C, Palafox-Carlos H. Villa-Rodriguez J, Siddiqui MW. 2011. Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. *Food research international*, 44(7):1866-1874.
- B. Lewis. 1983. Lipoproteins predictors protectors and pathogens. *Br. Med. J.* pp. 287,1161.
- Balandrán-Quintana RR, Barbosa-Cánovas GV, Zazueta-Morales JJ, Anzaldúa-Morales A, Quintero-Ramos A. 1998. Functional and nutritional properties of extruded whole pinto bean meal (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Food Sci.* 63(1):113-116.

- Barbesgaard P, Heldt-Hansen HP, Diderichsen B. 1992. On the safety of *Aspergillus oryzae*: a review. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 36: 569-572.
- Beltrán, Y., Batista, P., Llauradó, G., Lebeque, Y., Bermúdez, R., Garcia, N., ... & Cos, P. (2016). Valor funcional y medicinal de extractos de *Pleurotus* sp.: propiedades antioxidantes. *Ciencia y Tecnología de los Alimentos*.
- Boyle RJ, Roy MR, Tang ML. 2006. Probiotic use in clinical practice: What are the risks? *The American Journal of Clinical Nutrition*. 83: 1256-1264.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, *28*(1), 25-30.
- Brown, L., Rosner, B., Willett, W. W., & Sacks, F. M. (1999). Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: A meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*, *69*(1), 30-42.
- C.J. Fielding. HDL: From Basic Biology to Clinical Aspects. Wiley VCH, 2007,
- C.T. Johansen, S. Kathiresan, R.A. Hegele. Genetic determinants of plasma triglycerides. *J Lipid Res*, 52 (2011), pp. 189-206
- Camire, M. E., Violette, D., Dougherty, M. P., & McLaughlin, M. A. (1997). Potato peel dietary fiber composition: Effects of peeling and extrusion cooking processes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *45*(4), 1404-1408.
- Cao G, Booth S, Sadowski J, Prior R. 1998. Increases in human plasma antioxidant capacity after consumption of controlled diets high in fruit and vegetables. *American Journal Clinical Nutrition* 68:1081.

- Cao G, Verdon C, Wu A, Wang H, Prior R. 1995. Automated oxygen radical absorbance capacity assay using the COBAS FARA II. *Clinical Chemistry* 41:1738-1744. 99
- Carro MD, Ranilla MJ, Tejido ML. 2006. Utilización de aditivos en la alimentación del ganado ovino y caprino. *Sitio argentino de producción* 3: 26-37.
- Cerletti, C., Esposito, S., & Iacoviello, L. (2021). Edible mushrooms and beta-glucans: Impact on human health. *Nutrients*, *13*(7), 2195.
- Coenen TM. 2000. Safety evaluation of lactate enzyme preparation derived from *Kluyveromyces lactis*. *Food Chemistry Toxicology*. 38: 671-677.
- Colonna P, Tayeb J, Mercier C. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products, in: *Extrusion Cooking*. Ed. by Mercier C, Linko P, and Harper JM. AACC Published, St. Paul, MN. pp 247-319.
- D.B. Zilversmit., Atherogenic nature of triglycerides, postprandial lipidemia, and triglyceride-rich remnant lipoproteins. *Clin Chem*, 41 (1995), pp. 153-158
- De la Parra, C., Saldivar, S. O., & Liu, R. H. (2007). Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *55*(10), 4177-4183.
- Delgado-Murillo, S. A., Zazueta-Morales, J. J., Quintero-Ramos, A., Castro-Montoya, Y. A., Ruiz-Armenta, X. A., Limon-Valenzuela, V., & Delgado-Nieblas, C. I. (2024). Effect of the extrusion process on the physicochemical, phytochemical, and cooking properties of gluten-free pasta made from broken rice and chickpea flours. *Biotechnia*, *26*, 112-121.

- Delgado-Nieblas, C., Ruiz-Beltrán, K., Sánchez-Lizárraga, J., Zazueta-Morales, J. J., Aguilar-Palazuelos, E., Carrillo-López, A., ... & Quintero-Ramos, A. (2019). Effect of extrusion on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of breakfast cereals produced from bran and dehydrated naranjita pomace. *CyTA - Journal of Food*, *17*(1), 240-250.
- Dello Russo, M., Spagnuolo, C., Moccia, S., Angelino, D., Pellegrini, N., Martini, D., & Italian Society of Human Nutrition (SINU) Young Working Group. (2021). Nutritional quality of pasta sold on the Italian market: The food labelling of Italian products (FLIP) study. *Nutrients*, *13*(1), 171.
- FAO/WHO/UNU. (1985). *Energy and protein requirements*. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. WHO Technical Report Series No. 724. World Health Organization.
- Faubion JM, Hosene RC. 1982. High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. *Cereal Chem.* 59:529-533.
- Figueroa V. 1996. Producción porcina con cultivos tropicales y reciclajes de nutrientes. La Habana, Cuba. Editorial Academia. 192 p.
- Fleet, G. H. 1991. Cell walls. Pages 199–277 in *The Yeasts*, 2nd edn, vol 4, A. H. Rose, and J. S. Harrison, eds. Academic Press, New York.
- Gauntner J. 2002. *The Saké handbook*. 2nd ed. Singapur: Tuttle Publishing. 248 p.
- Gil HA. 2010. *Tratado de nutrición. Composición y calidad nutritiva de los alimentos*. 2ª ed. Medica Panamericana. México D.F. México. 812p.
- Gil-Chávez GJ, Villa JA, Ayala-Zavala F, Basilio-Heredia J, Sepulveda D, Yahia EM, González-Aguilar GA. 2013. Technologies for extraction and production of

- bioactive compounds to be used as nutraceuticals and food ingredients: an overview. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. DOI: 10.1111/15414337.12005.
- Gomi, K. (2014) *ASPERGILLUS | Aspergillus oryzae*, 2da ed., vol. 1., Elsevier B.V., Amsterdam.
- Goñil, Valentín-Gamazo C. 2003. Chickpea flour ingredient slows glycemic response to pasta in healthy volunteers. *Food Chemistry* 81: 511-515.
- Gordon, T., Castelli, W. P., Hjortland, M. C., Kannel, W. B., & Dawber, T. R. (1977). High density lipoprotein as a protective factor against coronary heart disease: The Framingham Study. *American Journal of Medicine*, *62*(5), 707-714.
- Granito M, Ascanio V. 2009. Desarrollo y transferencia tecnológica de pastas funcionales extendidas con leguminosas. *Archivos latinoamericanos de Nutrición, Órgano Oficial de la Sociedad Latinoamericana de nutrición* 59:71-77.
- Granito M, Torres A, Guerra M. 2003. Desarrollo y evaluación de una pasta a base de trigo, maíz, yuca y frijol. *Interciencia* 28:372-379.
- Grundy, S. M., Stone, N. J., Bailey, A. L., Beam, C., Birtcher, K. K., Blumenthal, R. S., ... & Yeboah, J. (2019). 2018 AHA/ACC/AACVPR/AAPA/ABC/ACPM/ADA/AGS/APhA/ASPC/NLA/PCNA guideline on the management of blood cholesterol. *Journal of the American College of Cardiology*, *73*(24), e285-e350.
- Gujaska E, Khan K. 1990. Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fractions of navy, pinto and garbanzo beans. *J. Food Sci.* 55:466-469.

- Gupta, V. K. (2016) New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: *Aspergillus* system properties and applications, 1er ed., Elsevier B.V., Amsterdam.
- Handayani, D., Meyer, BJ, Chen, J., Tang, P., Kwok, PCL, Chan, HK y Huang, XF (2012). Comparación del efecto del polvo de avena y de hongos shiitake para prevenir el aumento de peso corporal en ratas alimentadas con una dieta rica en grasas. *Ciencias de la alimentación y la nutrición* .
- Hernández DR. 1999. Efecto de un cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* en consumo, digestibilidad y variables ruminales en borregos alimentados con pasto ovillo (*Dactylis glomerata*) cosechado a dos intervalos de rebrote. [Tesis de maestría]. Colegio de Posgraduados, Montecillo Méx. 74 p.
- Hooge, D. M. 2004. Meta – análisis of broiler chicken pen trials evaluating dietary mannan oligosaccharide, 1993-2003. *Int.J. Poult. Sci.* 3:163-174.
- Hoseney, R. C. (1999). *Principles of Cereal Science and Technology* (3rd ed.). American Association of Cereal Chemists.
- Hsu HW, Vavak DL, Satterlee LD, Miller GA. 1977. A multienzyme technique for estimating protein digestibility. *Journal of Food Science.* 42(5):1269-1273.
- Ishak, N, Ahmad FBL, Rosfarizan M, Arbakariya BA, Mohd SM, Murni H, Helmi W. 2018. Kinetics and optimization of lipophilic kojic acid derivative synthesis in polar aprotic solvent using lipozyme rmim and its rheological study. *Molecules.* 23(2): 501.
- Ito, K. R., Sato, T., Goto, H., Sato, K., Watanabe, J., & Yokoo, M. (2022). Utilization of Sake lees as broiler feedstuff and its effects on growth performance and intestinal immunity. *Journal of Poultry Science*, *59*(3), 247-259.

- Izu H, Yamashita S, Arima H, Fujii T. 2019. Nutritional characterization of sake cake (sake-kasu) after heat-drying and freeze-drying. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 83(8): 1477–1483.
- J.L. Goldstein, M.S. Brown. The LDL receptor. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 29 (2009), pp. 431-438
- Jenkins, D. J., Kendall, C. W., Augustin, L. S., Martini, M. C., Axelsen, M., Faulkner, D., ... & Connelly, P. W. (2002). Effect of wheat bran on glycemic control and risk factors for cardiovascular disease in type 2 diabetes. *Diabetes Care*, *25*(9), 1522-1528.
- Juliano, B. O. (1993). *Rice in human nutrition*. FAO Food and Nutrition Series No. 26. Food and Agriculture Organization.
- Kambhampati S, Li J, Evans BS, Allen D K. 2019. Accurate and efficient amino acid analysis for protein quantification using hydrophilic interaction chromatography coupled tandem mass spectrometry. *Plant Methods*. 15: 46–60.
- Katsumata, S., Yamanaka, S., Yamauchi, M., Hirooka, H., & Kumagai, H. (2021). Evaluation of the chemical and biological characteristics of sake lees. *XXIV International Grassland Congress / XI International Rangeland Congress*.
- Kawakami, K., Moritani, C., Uraji, M., Fujita, A., Kawakami, K., Hatanaka, T., Suzaki, E., & Tsuboi, S. (2017). Sake lees hydrolysate protects against acetaminophen-induced hepatotoxicity via activation of the Nrf2 antioxidant pathway. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, *61*(3), 203-209.
- Kim JH, Tanhehco EJ, Ng PKW. 2006. Effect of extrusion conditions on resistant starch formation from pastry wheat flour. *Food Chemistry*. 99(4):718–723.

- Klis, F. M. 1994. Review: cell wall assembly in yeast. *Yeast*. 10: 851-869.
- Klis, F. M., A. Boorsma, and P. W. J. De Groot. 2006. Cell wall construction in *Saccharomyces cerevisiae*. *Yeast*. 23:185-2002.
- Kollár, R., B. B. Reinhold, E. Petráková, H. J. C. Yeh, G. Ashwell, J. Drgonová, J. C. Kapteyn, F. M. Klis, and E. Cabib. 1997. Architecture of yeast cell wall: β (1-6)-glucan interconnects mannoprotein, β (1-3)-glucan, and chitin. *J. Biol. Chem.* 272: 17762-17775.
- Kollár, R., E. Petráková, G. Ashwell, P. W. Robbins, and E. Cabib. 1995. Architecture of yeast cell wall: The linkage between chitin and β (1-3)-glucan. *J. Biol. Chem.* 270: 1170-1178.
- Kreisberg, RA y Reusch, JE (2005). Hiperlipidemia (alta grasa en la sangre). *Revista de Endocrinología Clínica y Metabolismo* , 90 (3), b.
- Kubo, H., Hoshi, M., Matsumoto, T., Irie, M., Oura, S., Tsutsumi, H., ... & Saito, K. (2017). Sake lees extract improves hepatic lipid accumulation in high fat diet-fed mice. *Lipids in Health and Disease*, *16*(1), 106.
- Lerma-García, M. J., Herrero-Martínez, J. M., Simó-Alfonso, E. F., Mendonça, R. B., & Ramis-Ramos, G. (2009). Composition, industrial processing and applications of rice bran γ -oryzanol. *Food Chemistry*, *115*(2), 389-404.
- Li A, Pfelzer N, Zuijderwijk R, Punt P. 2012. Enhanced itaconic acid production in *Aspergillus niger* using genetic modification and medium optimization. *BMC Biotechnol.* 12: 57-66.
- López-Díaz, A., Delgado-Nieblas, C., Zazueta-Morales, J., López-Angulo, G., Gómez, C. A., Calderón-Castro, A., Ruiz-Armenta, X., Camacho-Hernández, I., Limón-Valenzuela, V., & Aguilar-Palazuelos, E. (2025). Uso de sake kasu

para la producción de pasta funcional sin gluten: efecto del proceso de extrusión en las propiedades químicas, de cocción y antioxidantes. *Biotechnia*, *27*, e2648.

Lue, S., Hsieh, F., & Huff, H. E. (1991). Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber: Effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. *Cereal Chemistry*, *68*(3), 227-234.

M.J. Chapman, H.N. Ginsberg, P. Amarenco, F. Andreotti, J. Borén, A.L. Catapano, European Atherosclerosis Society Consensus Panel, et al. Triglyceride-rich lipoproteins and high-density lipoprotein cholesterol in patients at high risk of cardiovascular disease: Evidence and guidance for management. *Eur Heart J*, 32 (2011), pp. 1345-1361

Maki, K. C., Davidson, M. H., Witchger, M. S., Dicklin, M. R., & Subbaiah, P. V. (2007). Effects of high-fiber oat and wheat cereals on postprandial glucose and lipid responses in healthy men. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, *77*(5), 347-356.

Maldonado MC, Strasser de Saad AM. 1998. Production of pectinesterase and polygalacturonase by *Aspergillus niger* in submerged and solid-state systems. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2: 34-38.

Martínez-Flores HE. 1997. Estudios bioquímicos y nutricionales en tortilla de maíz elaboradas por un proceso de extrusión. [Tesis Doctoral]. México, DF, México. Disponible en: Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN). Departamento de Biotecnología y Bioingeniería.

- Martirosyan, DM. 2011. Funtional Foods and Chronic Diseases: Science and Practice. Denton, TX, USA: Foods Science Publisher.
- Mataix - Verdú, J. 2005. Nutrición para educadores. Segunda edición ed. España: Díaz de Santos.
- Menis-Henrique, M. E. C., Scarton, M., Piran, M. V. F., & Clerici, M. T. P. S. (2020). Cereal fiber: Extrusion modifications for food industry. *Current Opinion in Food Science*, *33*, 141-148.
- MIAZZO, R. D., PERALTA, M. F. & PICCO, M. 2005. Perfomance Productiva y Calidad de la canal en Broilers que recibieron levadura de cerveza (S. cerevisiae). REDVET6 (12).
- Mikami, N., Tsukada, Y., Pelopage, S. W., Han, K. H., Fukushima, M., & Shimada, K. (2020). Effects of Sake lees (Sake-kasu) supplementation on the quality characteristics of fermented dry sausages. *Heliyon*, *6*(6), e03379.
- Mora-Rochín S, Gutiérrez-Urbe JA, Serna-Saldívar SO, Sánchez- Peña P, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J. 2010. Phenolic content and antioxidante ativity of tortillas produced from pigmented corns processed by convencional nixtamalization of extrusion cooking. *Journal Cereal Science*. 52: 502-508.
- Moraru, C. I., & Kokini, J. L. (2003). Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *2*(4), 147-165.
- Motono, Y., Imai, T., Emi, T., Iguchi, T., & Takaoka, M. (2021). Effect of Sake lees on the inhibition of lipid accumulation in adipocytes. *Fermentation*, *7*(3), 145.

- Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(7), 3380.
- Nakashima, A., Yamada, K., Iwata, O., Sugimoto, R., Atsuji, K., Ogawa, T., ... & Suzuki, K. (2018). β -Glucan in foods and its physiological functions. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, *64*(1), 8-17.
- Neder-Suárez, D., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., de Jesús Zazueta-Morales, J., Paraguay-Delgado, F., & Ruiz-Gutiérrez, M. G. (2021). Evaluation of the physicochemical properties of third-generation snacks made from blue corn, black beans, and sweet chard produced by extrusion. *Food Science and Technology*, *146*, 111414.
- Nguyen, T. H., G. H. Fleet, and P. L. Rogers. 1998. Composition of the cell wall of several yeast species. *App. Microbiol. Biotechnol.* 50: 206-212.
- Nishidono, Y., Misaka, S., Maejima, Y., Shimomura, K., & Tanaka, K. (2024). Comparative analysis of functional components in Sakekasu (Sake lees). *Functional Foods in Health and Disease*, *14*(1), 74-86.
- Ola ARB, Metboki G, Lay CS, Sugi Y, De Rozari P, Darmakusuma D, Hakim EH. 2019. Single production of kojic acid by aspergillus flavus and the revision of flufuran. *Molecules*. 24: 4200.
- Oriol, E. 2004. SAF-Mannan: Origen, producción y análisis. CD in VI seminario internacional (Microbiología aplicada a nutrición animal). Lesaffre Feed Additives/Saf Agri. Nov. 4, Veracruz, México.

- Orleans, P. 1997. Biogenesis of yeast wall and surface components. Pages 229-362 in Cell Cycle and Cell Biology, vol 3, J. R. Pringle, J. R. Broach, E. W. Jones, eds. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, NY.
- Osumi, M. 1998. The ultrastructure of yeast: cell wall structure and formation. *Micron*. 29: 207-233.
- Ou B, Pior L. 2001. Development and Validation of an Improved Oxygen Radical Absorbance Capacity Assay Using Fluorescein as the Fluorescent Probe. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 9 (10): 4619–4626.
- Prior RL, Wu X, Schaich K. 2005. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal Agricultural and Food Chemistry* 53(10):4290-4302.
- Querol A. 2003. Molecular evolution in yeast of biotechnological interest. *International Microbiology*. 6: 201-05.
- R.S. Rosenson, H.B. Brewer Jr., W.S. Davidson, Z.A. Fayad, V. Fuster, J. Goldstein, et al. Cholesterol efflux and atheroprotection: Advancing the concept of reverse cholesterol transport. *Circulation*, 125 (2012), pp. 1905-1919
- Rangel UP. 2007. Que se come en Italia?. Disponible de: <http://ameritalia.id.usb.ve>. Consultado el 4 de junio de 2022.
- 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 and Medicine*, *26*(9-10), 1231-1237.
- Rossen JL, Miller RC. 1973. Food extrusion. *Food Technology* 27:46-53

- S. Calandra, P. Tarugi, H.E. Speedy, A.F. Dean, S. Bertolini, C.C. Shoulders. Mechanisms and genetic determinants regulating sterol absorption, circulating LDL levels, and sterol elimination: Implications for classification and disease risk. *J Lipid Res*, 52 (2011), pp. 1885-1926
- Saito, Y., Wanezaki, K., Kawato, A., & Imayasu, S. (1994). Structure and activity of angiotensin I converting enzyme inhibitory peptides from sake and sake lees. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, *58*(10), 1767-1771.
- Serna-Saldívar, S. O. (2022). *Snack Foods: Processing, Innovation, and Nutritional Aspects*. CRC Press.
- Shakibaie M, Ameri A, Ghazanfariand R, Adeli-Sardoua M, Amirpour-Rostami S, Torkzadeh-Mahani M, Imanif M, Forootanfar H. 2018. Statistical optimization of kojic acid production by a UV-induced mutant strain of *Aspergillus terreus*. *Biotechnology and Industrial Microbiology*. 4(9): 865–871.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, *299*, 152-178.
- Siro I, Káponla E, Lugasi A. 2008. Functional food. Product development, marketing and consumer acceptance- A review. *Appetite*, 51:456-467.
- Solano G, Cobos V, Fernández JL, Ramírez R, Cabrales D. 2001. Elaboración y evaluación de subproductos industriales para la alimentación animal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 35(4). ISSN: 0034- 7485.
- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., Ibanoglu, E., & Ibanoglu, S. (2008). Cauliflower by-products as a new source of dietary fibre, antioxidants and

- proteins in cereal based ready-to-eat expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, *87*(4), 554-563.
- Stone, C. W. 2006. Yeast products in the feed industry. A practical guide for feed professionals.
- Theuwissen, E., & Mensink, R. P. (2008). Water-soluble dietary fibers and cardiovascular disease. *Physiology & Behavior*, *94*(2), 285-292.
- Torres A, Frias J, Granito M, Guerra M, Vidal-Valverde C. 2007. Chemical, biological and sensory evaluation of pasta products supplemented with α -galactoside-free lupin flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87: 74-81.
- Tsutsui, N., Yamamoto, Y., & Iwami, K. (1998). Protein-nutritive assessment of sake lees obtained by brewing from liquefied rice. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, *44*(1), 177-186.
- Tudorica CM, Kuri V, Brennan CS. 2002. Nutritional and physicochemical characteristics of dietary fiber enriched pasta. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 347-356.
- Wolfe, KE., Liu, RH. 2003. Apple peels as value-added food ingredient. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*; 51: 1676-1683.
- Wu X, Gu L, Pior L, McKay S. 2004. Characterization of Anthocyanins and Proanthocyanidins in Some Cultivars of Ribes, Aronia, and Sambucus and Their Antioxidant Capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (26): 7846–7856.
- Yamashita, S., Hata, M., Kikuchi, N., Kinoshita, M., & Miyazawa, T. (2020). Effects of dietary ethanol extracts from sake rice and sake lees on intestinal impairment in mice. *Journal of Oleo Science*, *69*(8), 929-939.

Zazueta-Morales JJ, Martínez-Bustos F, Jacobo-Valenzuela N, Ordorica-Falomir C, Paredes-López O. 2001. Effect of the addition of calcium hydroxide on characteristics of extruded products from blue maize (*Zea mays* L.) using response surface methodology. *Journal Science Food Agriculture* 81:1379-1386.