

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“CALENTAMIENTO ÓHMICO COMO
HERRAMIENTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS
PROPIEDADES TECNO-FUNCIONALES DE HARINA DE
FRIJOL”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

INGRID ITALIA LIMA BECERRA

DIRIGIDA POR

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“CALENTAMIENTO ÓHMICO COMO
HERRAMIENTA PARA EL MEJORAMIENTO DE
LAS PROPIEDADES TECNO-FUNCIONALES DE HARINA
DE FRIJOL”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

INGRID ITALIA LIMA BECERRA

DIRIGIDA POR

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

SINODALES

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

DIRECTOR

Dr. LUIS ALFONSO MOJICA CONTRERAS

SINODAL

Dra. MA. GUADALUPE FLAVIA LOARCA PIÑA

SINODAL

QFB. MARÍA GUADALUPE BALBUENA ALONSO

SINODAL

AGRADECIMIENTOS

A mis papás, por todo su amor y paciencia, porque sentaron las bases de lo que soy y este proyecto también es la culminación de todo su esfuerzo, gracias por siempre encontrar la manera de impulsarme a seguir adelante, los amo.

A mis hermanos, Alexis, Allan y Michelle, por todo el infinito amor que cada uno me da a su manera, por todo el apoyo que recibí a lo largo de mi carrera y, junto con mi cuñada y mi sobrino, ser lo mejor que tengo en la vida. Los amo.

A la Dra. Marcela, por ser mi mentora, por nunca dudar de mi capacidad, por el apoyo y guía que recibí desde el primer momento, tanto académica como personalmente. Es un ser increíble, gracias por todo su cariño y por mostrarme el lado humano de la investigación. Tiene un lugar especial en mi corazón.

Al Dr. Luis, la Dra. Flavia y la Dra. Aurea, por siempre mostrar amabilidad y disposición para apoyarme a lo largo de este proyecto, muchas gracias.

A Lupita, por no solo asesorarme durante este trabajo, si no desde que te conozco. Las palabras no me alcanzan para agradecerte todo tu cariño, paciencia, confianza y lecciones. Por apoyarme en todo momento y nunca dejarme vencer, gracias.

A Adri, por acogerme bajo tu tutela, por tener siempre una enorme disposición para ayudarme y enseñarme, por compartirme tu vida y dejarme ser parte de ella. Por darme la oportunidad de también conocer a Ángel, ambos son maravillosas personas, mil gracias por todo su apoyo.

A Isa, Fer, Marthita, Ile e Isa2, les agradezco enormemente su amistad sincera, por sus cuidados, cariño y tener siempre los brazos abiertos para mí. Amistades como la suya se dan pocas veces en la vida. A Cris, por ser mi mejor amiga y una de las mejores personas que conozco, eres parte de mi inspiración para seguir esforzándome, te adoro infinitamente. A Yajaira, por ser mi mamá académica y por darme su cariño muy a su manera, eres la persona que sentó las bases en mis primeros pininos dentro de la investigación, muchas gracias.

A mis amiguitos del laboratorio, Vane, Ely, Abril, Diego, Norma, Rodrigo, Fer, Karen y Amanda, por dejarme inmiscuirme en su círculo y aceptarme, por todos esos días de pan, café y carcajadas, agradezco mucho su amistad.

A mis amigas de la carrera, Fer, Vale y Alma, por ser un tremendo equipo, siempre y a pesar de todo, las quiero mucho. Ana Pau y Joana por su apoyo, cariño y amistad desde el día 1. A mis Qfos, por ser la mejor compañía.

Al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), especialmente al Dr. Morales.

A FOFI por el apoyo otorgado a este proyecto.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por ser mi alma mater.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE CUADROS	ixx
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	
1 ANTECEDENTES	1
1.1 Frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	1
1.2 Importancia del frijol	2
1.2.1 A nivel internacional	2
1.2.2 A nivel nacional	3
1.2.3 Composición química	5
1.2.4 Compuestos bioactivos	8
1.2.5 Factores antinutricionales	10
1.3 Forma de cocción del frijol	12
1.4 Aprovechamiento e industrialización del frijol	14
1.5 Harina de frijol	15
1.6 Extrusión	17
1.6.1 Extrusión de frijol	19
1.7 Calentamiento óhmico	20
1.7.1 Procesamiento de frijol por calentamiento óhmico	21
2 HIPÓTESIS	23
3 OBJETIVOS	24
3.1 General	24

3.2 Específicos	24
4 METODOLOGÍA	25
4.1 Materiales y Reactivos	25
4.1.1 Material biológico	25
4.1.2 Reactivos	25
4.2 Métodos	25
4.2.1 Obtención de harina por cocción tradicional	25
4.2.2 Obtención del extruido de frijol	26
4.2.3 Obtención de harina por calentamiento óhmico	26
4.2.4 Análisis proximal	27
4.2.5 Determinación de parámetros fisicoquímicos de la harina	29
4.2.6 Determinación de factores antinutricios	31
4.3 Diseño experimental	34
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1 Composición proximal	35
5.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos de la harina de frijol procesadas por calentamiento óhmico y proceso tradicional	36
5.2.1 Índice de absorción de agua	36
5.3 Capacidad de absorción de aceite	38
5.4 Capacidad emulsificante	40
5.5 Capacidad espumante	42
5.6 Capacidad gelificante	45
5.7 Viscosidad	47
5.8 Electroforesis de proteínas	51
5.9 Cuantificación de proteínas solubles	53

5.10	Cuantificación de compuestos antinutricios	56
5.10.1	Cuantificación de lectinas	56
5.11	Cuantificación de inhibidores de tripsina	57
6	CONCLUSION	60
7	BIBLIOGRAFÍA	60

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE CUADROS

Figura		Página
1	Composición química del frijol crudo	6
2	Contenido de oligosacáridos, fenoles totales y taninos condensados de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) crudo, cocido y FND cultivar Bayo Madero	10
3	Propiedades fisicoquímicas de algunas harinas de frijol	16
4	Condiciones de calentamiento óhmico para cada harina	26
5	Contenido de proteína, lípidos, cenizas, carbohidratos y humedad en el producto crudo	35
6	Estabilidad de la espuma (%) de las harinas de frijol procesadas con diferentes tratamientos	44
7	Capacidad de gelificación de las harinas de frijol procesadas con diferentes tratamientos	46
8	Propiedades de pasta de harina de frijol crudo y procesado	48
9	Concentración de hemaglutinación/mg de proteína soluble	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Distribución de la producción de frijol en México	4
2	Diagrama de un extrusor	19
3	Diagrama esquemático que muestra el principio de calentamiento óhmico	21
4	Sistema utilizado para proceso de calentamiento óhmico	27
5	Índice de absorción de agua	37
6	Capacidad de absorción de aceite	39
7	Capacidad emulsificante de las harinas de frijol procesadas con diferentes tratamientos	41
8	Capacidad espumeante de las harinas de frijol procesadas por diferentes tratamientos	43
9	Viscoamilograma de las harinas de frijol procesadas por los diferentes tratamientos térmicos	47
10	Electroforesis de las harinas de frijol procesadas	52
11	Concentración de proteínas de cada muestra de harina	55
12	Inhibición de tripsina para cada muestra de harina	58

RESUMEN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es parte importante de la dieta en México debido a su alta disponibilidad y bajo costo, que además se ha asociado con la prevención y reducción de enfermedades no transmisibles. Debido a esto, la aplicación de tecnologías de procesamiento ha ido creciendo con el enfoque de mejorar el perfil nutricional y bioactivo del frijol, y con ello aumentar la utilidad del frijol empleándose como harina, donde las propiedades funcionales dependen principalmente de las proteínas y carbohidratos, por lo que el procesamiento de la materia prima influye directamente en las propiedades tecno-funcionales. El objetivo de este trabajo fue demostrar la ventaja del calentamiento óhmico contra la cocción tradicional y por extrusión, en harinas de frijol, evaluando y comparando sus características tecno-funcionales y factores antinutricios. Dentro de los resultados encontrados se destaca que el calentamiento óhmico no presentó diferencias significativas contra la cocción por extrusión y tradicional en cuanto a la tecno-funcionalidad, sin embargo, la condición a 110°C (10 y 15 min) obtuvo valores más altos en capacidad espumeante, emulsificante y viscosidad. Por otra parte, no hubo diferencias en el perfil electroforético de proteínas de las harinas de frijol. Así mismo, el tratamiento óhmico redujo los inhibidores de tripsinas entre 25.42 y 57.44%, no cambiando el perfil de solubilidad de proteínas. Estos resultados nos sugieren que el procesamiento del frijol por calentamiento óhmico puede ser una alternativa a los tratamientos convencionales, además de reducir el tiempo de procesamiento, con mayor eficiencia energética y no presentar lixiviación de nutrientes.

Palabras clave: Calentamiento óhmico, frijol común, extrusión, tecno-funcionalidad, antinutricios.

1 ANTECEDENTES

1.1 Frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)

La planta de frijol es una h rbacea que pertenecen a la familia de las leguminosas, junto a los chicharos, haba, soya, mezquites, huizaches, cacahuate, entre otros. Por sus cualidades nutritivas, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la cataloga como la leguminosa alimenticia más importante en el consumo humano en el mundo, considerada junto con otras legumbres como fundamental para la seguridad alimentaria de una nación, siendo la principal fuente de proteína vegetal en el continente americano y africano, donde las proteínas animales son limitadas por razones económicas, religiosas y/o culturales. En México, ocupa el segundo lugar en importancia, solo después del maíz (FIRA, 2016), distinguiéndose por su alto contenido de proteína, y, en menor medida, por su aportación de carbohidratos, fibra dietética, vitaminas, minerales y fitoquímicos (Tharanathan y Mahadevamma, 2003); además de su alta disponibilidad, relativo bajo costo y su tradición cultural que impulsa y preserva la identidad alimentaria mexicana.

Además, el consumo de frijol se ha asociado con la prevención y reducción de varias enfermedades crónicas y degenerativas como el cáncer, la obesidad, la diabetes y las enfermedades cardiovasculares (Costa y Rosa, 2008; Campos-Vega y col., 2013), por su contenido de fitoquímicos, relacionados con la actividad antioxidante, efectos antimutagénicos y anticancerígenos (Cardador-Martínez y col., 2002).

Sin embargo, el consumo per cápita de frijol en México ha mostrado una tendencia a la baja durante los últimos treinta años, al pasar de un promedio de 16 kilogramos por persona por año a 9.9 kilogramos. Lo anterior se puede atribuir a diversos factores, como el urbanismo, cambios en el poder adquisitivo de la población y la incorporación de la mujer a la actividad laboral (FIRA, 2016), esto sumado al cambio en el consumo de frijol en grano por frijol industrializado, debido a la reducción del tiempo de preparación.

Con la finalidad de mejorar el consumo de frijol, se ha propuesto su uso como harina (Wani y col., 2013a), que puede utilizarse como ingrediente funcional en diversos alimentos como tortillas, panes, galletas, y así, aumentar su valor nutricional.

1.2 Importancia del frijol

1.2.1 A nivel internacional

De acuerdo a estudios de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el frijol, es la leguminosa alimenticia más importante en el consumo humano en el mundo. Este cultivo es producido en sistemas, regiones y ambientes tan diversos como América Latina, África, el Medio Oriente, China, Europa, los Estados Unidos, y Canadá.

América Latina es el principal productor y consumidor de frijol común; en África, se cultiva principalmente para la subsistencia, mientras que en Asia es menos importante que otras legumbres. El crecimiento de la producción mundial de frijol se ha mantenido a una tasa media de crecimiento anual de 1.6 % entre 2003 y 2014, ubicándose en 25.1 millones de toneladas. Durante este periodo se mostró un crecimiento promedio anual en superficie cosechada y rendimiento del 0.5% y 1% respectivamente. América, África y Asia han incrementado significativamente la producción (49%, 145% y 36%, respectivamente), mientras que Europa experimentó una disminución de aproximadamente 35% (Joshi y Rao, 2017).

Las legumbres representan un componente importante de la dieta humana en varias áreas del mundo, sin embargo, existen siete países donde se concentra más de 62% de la producción mundial de frijol: Brasil con 16%, seguido de India con el 15.9%, Myanmar con 10.5%, China con 8.9%, México con 5.5%, Estados Unidos con 5.3% y finalmente Tanzania con 4.1% (FIRA, 2016).

En cuanto al consumo, se estiman 17 millones de toneladas, y al igual que la producción, solo algunos países acaparan el 57.7% del consumo mundial, entre ellos se encuentran India (24.7%), Brasil (19%), Estados Unidos (5.5%), México (5.3%) y Tanzania (3.3%) (FIRA, 2016).

Entre las leguminosas de grano, el frijol común es de gran interés agronómico y nutricional en todo el mundo, y representa alrededor del 50% de las leguminosas de grano para el consumo humano directo. Entre los principales cultivos alimentarios, tiene uno de los niveles más altos de variación en el hábito de crecimiento, adaptación ambiental, características de la semilla (tamaño, forma y color) y clases de consumo (hojas, vainas verdes, semillas inmaduras, semillas secas), además representa la fuente más importante de proteínas para cerca de 500 millones de personas en África, América y el Caribe; en particular, para personas de bajos ingresos (Cortés y col., 2013), teniendo el potencial para aumentar la seguridad alimentaria. Igualmente, está emergiendo como una generación de ingresos importante entre los cultivos de campo, especialmente en América Central. En términos de producción global de pulsos, el frijol común solo con 23 millones de toneladas representa aproximadamente la mitad de la producción total de pulsos (FAO, 2012).

1.2.2 A nivel nacional

México es considerado uno de los centros de origen del frijol. Se considera que en el país existen más de 70 variedades nativas de frijol, los cuales se distribuyen en siete grupos principales: negros, amarillos, blancos, morados, bayos, pintos y moteados (Escamilla, 2013).

El frijol es el cuarto cultivo en importancia por la superficie sembrada en México, después del maíz grano, pastos y el sorgo grano. Por su amplia adaptación y por el número de variedades mejoradas disponibles, el cultivo de esta leguminosa se realiza prácticamente en todas las regiones, condiciones climáticas y tipos de suelos en el país. No obstante, hay siete principales entidades productoras de frijol en donde se concentra aproximadamente el 76.6 % de la cosecha nacional, que son: Zacatecas (29.9%), Durango (11.5%), Sinaloa (8.7%), Chihuahua (9.9%), Chiapas (6.2%), San Luis Potosí (4.6%) y Guanajuato (5.7%) (SAGARPA, 2017).

Los frijoles son las leguminosas más producidas y consumidas en el país; ocupando el cuarto lugar como productor, generando el 5.5% de la producción mundial. A nivel nacional, representa un cultivo clave en la dieta del país; el consumo anual per cápita

es de 9.9 kg (SAGARPA, 2017); la producción nacional se destina principalmente al consumo, autoconsumo y exportación. Actualmente se satisface el 89.24% del consumo nacional (Figura 1); importando el porcentaje restante de países como Estados Unidos (84.07%), Canadá (13.55%) y China (2.05%); sin embargo, su consumo ha mostrado una tendencia a la baja en las últimas décadas, pasando de 16 kg en la década de 1980 (FIRA, 2016; SAGRPA, 2018), al consumo que tenemos en la actualidad (9.9 kg).

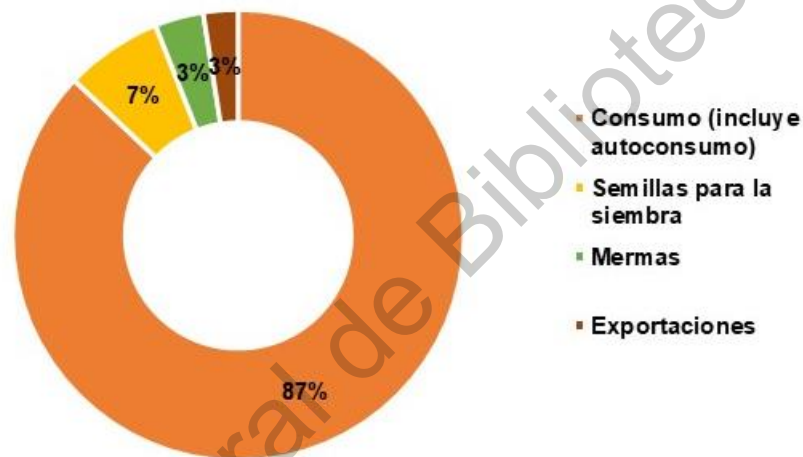


Figura 1. Distribución de la producción de frijol en México (SAGARPA, 2017)

En nuestro país existen básicamente tres tipos de dietas, cuyo consumo está determinado por el nivel de ingreso. Con base en esta clasificación, los niveles D+, D y E, representan un 60.8% de la población mexicana (con ingresos entre los 3,129 y 13,499 pesos mensuales) y su dieta está basada principalmente en cereales (tortilla), leguminosas (con el frijol como principal componente), verduras, leche y derivados, carnes, y huevo (García-Urigüen, 2012).

Por esta razón, México ha tenido que establecer una política comprometida con la soberanía alimentaria con mecanismos que estimulen la producción de granos básicos, tales como el maíz y el frijol, pilares fundamentales en la dieta, ya que la mayoría de la población obtiene los nutrientes que necesita de estas fuentes.

La estrategia para el frijol, es mantener la producción para satisfacer el abasto nacional y desarrollar una estrategia de reconversión a cultivos de mayor valor como frutas y hortalizas; consolidar tratados con Estados Unidos, Canadá, Japón, Reino Unido, Italia y Brasil (SAGARPA, 2017); instrumentar campañas de utilización de semillas mejoradas, que incrementen y destaquen sus beneficios en relación con la productividad, calidad, sanidad e inocuidad; y optimizar el aprovechamiento de la capacidad instalada para el beneficio y procesamiento industrial del frijol. Estimando para 2030 un aumento en el consumo y producción nacional del frijol de 18.42 y 118.5% respectivamente (SAGARPA, 2017).

1.2.3 Composición química

Entre las legumbres, el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) presenta un contenido considerable de vitaminas, minerales, proteínas, carbohidratos complejos y fibra dietética (Tharanathan y Mahadevamma, 2003; Ranilla y col., 2009; Saha y col., 2009; Slupski 2010); además, posee un bajo contenido de grasa (Serrano y Goñi, 2004). Al igual que otras legumbres, contiene numerosas sustancias bioactivas, incluidos inhibidores de enzimas, lectinas, fitatos, oligosacáridos y compuestos fenólicos que desempeñan funciones metabólicas en humanos o animales que frecuentemente consumen estos alimentos (Campos-Vega y col., 2009).

Debido a su composición química, los frijoles poseen propiedades funcionales, proporcionando varios beneficios para la salud. Tiene influencia en la manipulación dietética de enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus, obesidad, y cáncer (Costa y Rosa, 2008).

Cuadro 1. Composición química del frijol crudo

Indicador	Contenido
Composición química (%)	
Proteína	14-33
Lípidos	1.5-6.2
Carbohidratos	52-76
Fibra total	14-19
Insoluble	10.1-13.4
Soluble	3.1-7.6
Cenizas	2.9-4.5
Aminoácidos esenciales (g/100g proteína)	
Fenilalanina+Tirosina	5.3-8.2
Isoleucina	2.8-5.8
Leucina	4.9-9.9
Lisina	6.4-7.6
Metionina+Cisteína	1.2-1.5
Treonina	4.4-7.0
Valina	4.5-6.7
Vitaminas (mg/100 g)	
Tiamina (B1)	0.86-1.14
Riboflavina (B2)	0.14-0.27
Niacina (B3)	1.16-2.68
Piridoxina (B6)	0.34-0.64
Ácido fólico	0.17-0.58
Minerales (mg/100 g)	

Indicador	Contenido
Calcio	9-200
Cobre	0.7-1.2
Fósforo	460
Hierro	3.8-7.6
Magnesio	200
Zinc	2.2-4.4
Otros componentes	
Taninos (mg eq.cat/g) ^a	9.6-131.4
Inhibidores de tripsina (UIT/mg) ^b	13-29
Ácido fítico (%)	0.6-2.7

^a Miligramos de equivalentes de catequina por gramo

^b Unidades de inhibición de tripsina por miligramo

(Paredes-López y col., 2006)

Los carbohidratos son el principal componente del frijol, su contenido en semillas es de 50-76% dependiendo de la variedad (Barampama y Simard, 1993; Vargas-Torres y col., 2004; Campos-Vega y col., 2009), con polisacáridos como sus principales constituyentes, y pequeñas pero significativas cantidades de oligosacáridos (31% - 76% del total de azúcares). Estas fracciones incluyen almidón, azúcares solubles y fibra dietética (Campos-Vega y col., 2013).

Los componentes principales en la fibra dietética son carbohidratos complejos (como almidón resistente, pectina y oligosacáridos) y lignina. Sus componentes son sustratos potenciales para la fermentación colónica como un compuesto bifidogénico; estas son sustancias que estimulan el crecimiento y / o actividad de un número limitado de bacterias coloniales capaces de producir ácidos grasos de cadena corta (AGCC), como acetato, propionato y butirato (Roberfroid, 1993). Los beneficios para la salud, incluyen la relajación, la atenuación del colesterol y glucosa en sangre y una mayor pérdida fecal de ácidos biliares (Campos-Vega y col., 2009).

El contenido de proteína en el frijol varía significativamente entre cultivares, que van del 17% al 30%, éstas contienen aminoácidos como tirosina, lisina, prolina, triptófano, metionina y cisteína, estas se distribuyen en el cotiledón (27 %), eje embrionario (48%) y cascarilla (5%) (Bello-Pérez y Paredes-López, 2009).

1.2.4 Compuestos bioactivos

Los compuestos bioactivos son fitoquímicos que se encuentran en los alimentos con la capacidad de modular ciertos procesos metabólicos y mejorar la salud. Éstos se encuentran en frutas, verduras y granos enteros (Carbonell-Capella y col., 2013; Gil-Chávez y col., 2013). Incluyen una clase diversa de compuestos (polifenoles, carotenoides, tocoferoles, fitoesteroles y compuestos de organosulfuro) con diferentes estructuras químicas (hidrófilas o lipófilas), distribución en la naturaleza (específica para especies vegetales o ubicuas), rango de concentraciones tanto en los alimentos y en el cuerpo humano, posible sitio de acción, efectividad contra especies oxidativas, y especificidad y acción biológica (Carbonell-Capella y col., 2014; Porrini y Riso, 2008). Entre los efectos benéficos de estos compuestos se encuentran: la actividad antioxidante, la inhibición o la inducción de enzimas, la inhibición de las actividades del receptor y la inducción e inhibición de la expresión génica (Correia y col., 2012). Sin embargo, la bioaccesibilidad y biodisponibilidad de cada compuesto bioactivo difiere dependiendo de la matriz de donde proceda. Además, reducen la incidencia de algunas enfermedades degenerativas como el cáncer y la diabetes (Campos-Vega y col., 2009), reducción en los factores de riesgo de enfermedades cardiovasculares (Jiménez y col., 2008), efectos antioxidantes, antimutagénicos, antialérgicos, antiinflamatorios y antimicrobianos (Balasundram y col., 2006; Ham y col., 2009; Parvathy y col., 2009), entre otros.

Al igual que otras leguminosas, el frijol común es una fuente rica de sustancias bioactivas que promueven varios efectos beneficiosos para la salud humana, entre ellas se incluyen inhibidores de enzimas, lectinas, fitatos, oligosacáridos y compuestos fenólicos, que están vinculados a la actividad antioxidante, efectos antimutagénicos y anticancerígenos (Cardador-Martínez y col., 2002b; Paredes-

López y col., 2006; Feregrino-Pérez y col., 2008; Campos-Vega y col., 2009; Campos-Vega y col., 2013) en seres humanos y/o animales que consumen frecuentemente estos alimentos. Estudios en animales han demostrado que el consumo regular de frijoles provoca una disminución en la incidencia del cáncer de colon (Hangen y Bennink 2002).

El frijol contiene una cantidad pequeña pero significativa de oligosacáridos, estos tienen diversos efectos benéficos para la salud, como la laxación, la reducción de colesterol y glucosa en sangre, el aumento de la pérdida fecal de ácidos biliares, entre otros. Estos suelen ser sustratos que no son digeridos por enzimas gastrointestinales y que son utilizadas para la fermentación colónica como un compuesto bifidogénico, provocando la estimulación selectiva del crecimiento y / o la actividad de un número limitado de bacterias colonicas capaces de producir ácidos grasos de cadena corta, principalmente acetato, propionato y butirato. Estos pueden provocar una flatulencia no deseada, pero también un posible efecto prebiótico (Trindade y col., 2003).

El grupo de flavonoides más ampliamente distribuido en frijoles son las proantocianidinas (glucósidos de flavonol, antocianinas y taninos condensados) donde se encuentra aproximadamente en una concentración de 9.4-37.8 mg (mg de equivalentes de catequina / 1 g de frijol) y se encuentran principalmente en la capa de semilla seca. La presencia de antocianinas se ha informado solo en frijoles de color negro y azul violeta. (Beninger y col., 2003; Cardador-Martínez y col., 2002b) Se ha demostrado que los compuestos flavonoides en frijoles tienen actividad biológica tanto *in vitro* como *in vivo* (Rafi y col., 2002; Katsube y col., 2003), teniendo tanto actividades antioxidantes como antimutagénicas (Duthie y col., 2000; Cardador-Martínez y col., 2002; de Mejía y col., 2003).

Cuadro 2. Contenido de oligosacáridos, fenoles totales y taninos condensados de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) crudo, cocido y FND cultivar Bayo Madero

	Rafino -sa	Estaquiosa	Verbascosa	Oligosac -áridos totales	Fenoles totales	Taninos condensad- os
(mg/ g muestra seca)						
Frijol crudo	12.3 ± 0.1 ^a	42.9 ± 0.1 ^b	4.6 ± 0.1 ^a	59.6 ± 0.2 ^a	0.7 ± 0.1 ^b	7.4 ± 0.1 ^c
Frijol cocido	10.4 ± 0.2 ^b	43.3 ± 0.1 ^a	2.1 ± 0.1 ^b	55.8 ± 0.2 ^b	1.0 ± 0.1 ^b	8.9 ± 0.1 ^b
FND	1.5 ± 0.1 ^c	13.8 ± 0.1 ^c	0.5 ± 0.1 ^c	15.8 ± 0.1 ^c	13.8 ± 0.7 ^a	14.0 ± 0.1 ^a

^aFND: fracción no digerible. Letras diferentes en cada columna expresan diferencias significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey.^bLos resultados son el promedio de dos experimentos independientes con duplicado \pm el error estándar.^c Los resultados son el promedio de tres experimentos independientes con duplicado \pm el error estándar. Vergara-Castañeda y col. (2010)

1.2.5 Factores antinutricionales

El término de factor antinutricional se refiere a los compuestos que reducen el aprovechamiento de ciertos nutrientes, así como la actividad biológica de diversos compuestos químicos o metabolitos (Van Der Poel, 1990).

A pesar del potencial relevante para la nutrición humana y animal, los frijoles contienen algunos compuestos antinutricionales, que impiden la digestión y absorción de ciertos componentes nutritivos. Entre estos factores se encuentran inhibidores de enzimas (tripsina, quimotripsina, α -amilasa), el ácido fítico, que reduce la biodisponibilidad de los minerales multivalentes, factores de flatulencia, saponinas y lectinas. Varios de los factores antinutricionales pueden ser removidos durante el procesamiento; sin embargo, el tratamiento térmico excesivo provoca la disminución

de la disponibilidad de lisina, resultando en la reducción de la calidad proteica (Bressani, 2002).

No obstante, hoy en día compuestos como el ácido fítico, el inhibidor de tripsina y algunos oligosacáridos, han sido explorados también como compuestos bioactivos, ya que tienen efecto sobre la digestibilidad y biodisponibilidad de nutrientes (Worku y col., 2017).

Los oligosacáridos se componen principalmente de rafinosa, estaquiosa y verbascosa. Se encuentran en el frijol y son considerados componentes prebióticos, que estimulan la actividad de bifidobacterias y lactobacilos en el colon, por lo que su consumo se considera benéfico (Chen y col., 2016). A pesar de ello, estos oligosacáridos no son digeridos por los seres humanos, debido a la carencia de la α -galactosidasa en el intestino delgado, pasando directamente al intestino grueso, donde son metabolizados por bacterias intestinales, dando lugar a la fermentación que producen dióxido de carbono, hidrógeno y metano dando como resultado a las flatulencias (Singh y col., 2017).

Aunque el efecto provocado por la fermentación de los oligosacáridos es una preocupación, no son tóxicos y pueden reducirse enjuagando previamente los frijoles (Ai y col., 2017). Estos junto con la fibra dietética, el almidón resistente/no digerible, contribuyen a modulación de la liberación de glucosa en el torrente sanguíneo, produciendo un índice glucémico más bajo (Singh y col., 2017).

El ácido fítico es un antioxidante que se encuentra en los cereales, las verduras, los frutos secos y los aceites naturales, y varía entre el 0,4% y el 0,6% en peso en los frijoles (Nikmaram y col., 2017). Es considerado un antinutriente principalmente debido a su capacidad para unirse a minerales esenciales como el calcio, hierro, magnesio y zinc, así como a proteínas y almidón, y, por consiguiente, a reducir su biodisponibilidad en seres humanos. Sin embargo, existen estudios que muestran su capacidad de inhibir las especies de oxígeno radicales, derivándose efectos preventivos y terapéuticos en diferentes enfermedades (Silva y col., 2016).

Los inhibidores de la proteasa (tripsina, quimotripsina, amilasa) se conforman de un grupo de proteínas que inhiben la proteólisis de la proteína procedente de algún alimento (Sumathi y Pattabiraman, 1976). Estos inhibidores retrasan la digestión de

proteínas en el intestino delgado, lo que resulta en la excreción de proteínas y la biodisponibilidad disminuida de los aminoácidos que contienen azufre. La presencia de inhibidores de la tripsina puede provocar hiperplasia pancreática y alteraciones metabólicas (Nikmaram y col., 2017). Para reducir la cantidad y los efectos indeseables de este y otros factores antinutricionales, se aplican tratamientos térmicos. El inhibidor de la tripsina en su forma inactivada puede servir potencialmente como una fuente de los aminoácidos que contienen azufre (Van Der Poel, 1990).

Otro factor antinutricio importante son los taninos, que se encuentran principalmente en la cubierta de la semilla y pueden unirse tanto a complejos proteicos (incluidas enzimas), como a minerales, que afectan el proceso de digestión, produciendo una disponibilidad limitada de nutrientes. El complejo formado (tanino-proteína) es el resultado de una serie de enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de los taninos y los grupos carbonilo de las proteínas. Debido a que los taninos se unen a las proteínas de la dieta y también a las enzimas digestivas, los complejos formados no son fácilmente digeribles (Nikmaram y col., 2017; Raes y col., 2014). Sin embargo, como con otros compuestos, esta reportado que los niveles de taninos se reducen después del calentamiento (Van Der Poel, 1990).

Las lectinas son proteínas de unión al azúcar con una alta selectividad de carbohidratos que pueden aglutinar los glóbulos rojos (Yin y col., 2015). Las lectinas pueden interferir con la digestión y la absorción de nutrientes en el tracto gastrointestinal y perjudicar el crecimiento en animales (Nikmaram y col., 2017). En seres humanos, el consumo de frijoles no cocidos completamente se relaciona con trastornos gastrointestinales transitorios con síntomas como náuseas, vómito y diarrea (Nciri y col., 2015). Sin embargo, su contenido en frijoles puede reducirse mediante su procesamiento.

1.3 Forma de cocción del frijol

Generalmente cualquier legumbre es consumida después de cocinar o tener algún tratamiento previo como el remojo antes de la cocción, el descascarillado, la

germinación, la fermentación o una combinación de diferentes métodos (Sharma y col., 1992; Granito y col., 2002), para reducir los impactos de diversos factores y lograr la palatabilidad del producto.

El tratamiento térmico que involucran la cocción y el asado son métodos de procesamiento comúnmente utilizado para eliminar factores antinutricionales y garantizar la calidad sensorial de las leguminosas (Satya y col., 2010; Gujral y col., 2013).

La hidratación de las semillas antes o durante la cocción es esencial. Regularmente se remoja en agua horas antes, a veces toda una noche, para ahorrar tiempo y energía al momento de la cocción (Fernandes y col., 2010). Además, la cocción causa algunos cambios fisicoquímicos en los pulsos, que incluyen la gelatinización del almidón, la desnaturalización de las proteínas, la solubilización de algunos de los polisacáridos y el reblandecimiento y degradación de la laminilla media, un material de cementación encontrado en el cotiledón (Vindiola y col., 1986; Wani y col., 2013b). Los factores que pueden afectar la calidad del proceso de cocción incluyen el cultivar del pulso, la estética del carácter y la composición de las semillas, el lugar de cultivo y el entorno (Gubbels y col., 1991; Bishnoi y col., 1993), así como la calidad de la semilla, incluyendo propiedades físicas, como el tamaño, el peso y las características de la cubierta de la semilla y el cotiledón (Sefa-Dedeh y col., 1979).

Existe otro factor que dificulta la utilización de frijoles llamado “difícil de cocinar”(HTC, por sus siglas en inglés). Es un fenómeno causado por cambios estructurales en la pectina, como consecuencia de un almacenamiento en condiciones de temperatura y humedad relativa no controladas. Durante el desarrollo de HTC, se mejora la adhesión célula-célula, lo que da como resultado una cocción prolongada y que la textura esperada no sea alcanzada fácilmente. Esto provoca que sea inaceptable para algunos consumidores (Paredes-López y col., 1991).

Investigaciones anteriores han demostrado los resultados de diferentes métodos de procesamiento en pulsos. El descascarillado es útil para la disminuir el contenido de taninos y calcio, así como para reducir el tiempo de cocción (Deshpande y col., 1983). El remojo favorece la eliminación de toxinas presentes en el frijol, pero causa pérdidas importantes en los sólidos solubles (Bressani, 1993). La cocción ayuda a

mejorar la digestibilidad de las proteínas (Nnann y col., 1990) pero en algunos casos puede causar pérdidas considerables en sólidos solubles, especialmente vitaminas y minerales (Buckle y col., 1990). Cuando se prolonga, la cocción puede reducir la calidad de la proteína nutritiva (Van der Poel y col., 1990); sin embargo, existen otros estudios que demuestran que el calentamiento altera los factores inherentes que inhiben la absorción de minerales, como los fitatos y la fibra dietética (Carbonara y col. 2001). La germinación aumenta el contenido de proteínas y vitaminas en los frijoles y mejora la digestibilidad de las proteínas; así como el valor biológico (Akinlosotu y col., 1991).

1.4 Aprovechamiento e industrialización del frijol

En nuestro país, el desarrollo industrial del frijol no está desarrollada más allá del sencillo proceso de limpieza y empaque. Aun cuando esta leguminosa ocupa el segundo lugar en importancia en la dieta alimenticia de la mayoría de la población mexicana; el consumo de frijol ha disminuido en los últimos años, debido al cambio en preferencias de los consumidores por alimentos preparados (Muñoz, 2010).

En México la participación del sector industrial de este producto es de apenas 5%, únicamente se contemplan dos tipos de industrias procesadoras básicas. La encostaladora, que se encarga únicamente de dar una mejor presentación al producto en cuanto homogeneidad y limpieza, ocupándose de la selección del grano, pulido, abillantado, embolsado o encostalado, sin que sufra mayores modificaciones. El valor agregado aportado es poco significativo y se estima que el 26% de la producción de frijol se destina a esta industria. El 40% de su producción se destina a la exportación hacia los E.U.A. La Industria de la transformación se limita al procesamiento del frijol deshidratado y enlatado en diversas presentaciones de platillos tradicionales, con valor agregado, como listos para consumirse, caldosos o refritos y combinados con otros ingredientes (tocino y chorizo), charros, entre otros, utilizando preferentemente frijol bayo y negro y, en menor proporción, el peruano, sin embargo, se estima que la participación de esta industria tan sólo alcanza un 5% de la producción nacional (FIRA, 2008). No obstante, la industria ha logrado disminuir

sus costos, permitiendo disminuir los precios unitarios de sus productos, convirtiéndolo en un factor indiscutiblemente importante para el consumidor objetivo (FIRA, 2001).

A pesar de ello, ciertamente es necesario aumentar el valor agregado de esta leguminosa, esto solamente puede lograrse elaborando más productos procesados a partir de frijol.

Actualmente, en el mercado pueden encontrarse productos que no solamente ofrecen el frijol como tal (Muñoz, 2010), además, existen alimentos combinados o elaborados a partir de este, como las barras de frijol, totopos y snacks que se elaboran en conjunto con este pulso; sin embargo, el reto sigue siendo llegar al nivel industrial.

1.5 Harina de frijol

Dado el perfil nutricional y bioactivo de los frijoles comunes, la aplicación de diversos procesos tecnológicos a las leguminosas para aumentar su uso como ingrediente en productos alimenticios manufacturados ha despertado el interés de países en desarrollo (Ramírez-Jiménez, 2014). El procesamiento mejora la calidad nutricional de los frijoles al reducir el contenido de factores antinutricionales (Siddiq y col., 2010) y, al mismo tiempo, diversifica su uso como ingredientes funcionales en la preparación de alimentos como tortillas, pastas, panes o bocadillos, para aumentar su valor nutricional (Wani, y col., 2013a).

Además de estos beneficios nutricionales, los frijoles también son libres de gluten, por lo que los productos hechos de harinas de frijol ofrecen alternativas a los productos a base de harina de trigo (Siddiq y col., 2013). Se ha informado que se proyecta que las ventas de productos sin gluten crecerán a una tasa anual del 25% durante los próximos años (Clemens & Dubost, 2008).

Se han propuesto varios procesos para obtener harinas, como la molienda seca, la extrusión y la deshidratación por cocción (Wani y col., 2013b; Ramírez-Jiménez y col., 2014). El proceso terma-alcálico, denominado proceso de nixtamalización

tradicional (TNP), es un método alternativo propuesto por Téllez-Téllez y colaboradores (2009) para obtener harinas con alto contenido de calcio y fibra.

Las propiedades funcionales de las harinas de leguminosas dependen principalmente de las proteínas, carbohidratos y otros componentes, por lo que el procesamiento de la materia prima influye en las propiedades funcionales de los ingredientes. Se sabe que las propiedades de hidratación, la unión, la hinchazón, la dispersabilidad y la viscosidad influyen directamente en las características de un sistema alimentario (McWatters, 1983). Por ejemplo, para obtener harinas deshidratadas, se aplica un calentamiento posterior a la ebullición a los ingredientes, este tratamiento adicional, afecta la concentración de antioxidantes endógenos naturales y otros fitoquímicos, así como las características tecnológicas de la harina (Ramírez-Jiménez, 2014). El proceso de extrusión reduce la viscosidad de la pasta, lo que contribuye a mejorar el contenido de nutrientes de los platillos a base de frijol, y hace que los productos sean adecuados para grupos vulnerables como niños y mujeres en edad fértil con altos requerimientos de nutrientes (Thaoge y col., 2003). Un estudio realizado por Nkundabombi y colaboradores en 2015 demostró que los procesos de malteado/tostado aumentan la biodisponibilidad de los minerales y mejoran la digestibilidad de la proteína de la harina de frijol *in vitro*.

Cuadro 3. Propiedades fisicoquímicas de harinas de frijol

Parámetro	Cultivar		
	Rojo	Negro	Cranberry
Proteína (g/100 g)	23.32 ±0.18a	23.24 ±0.22a	23.62 ±0.20a
Grasa (g/100 g)	3.53 ±0.07a	3.62 ±0.08a	3.46 ±0.11b
Cenizas (g/100 g)	4.60 ±0.09a	5.00 ±0.18a	4.87 ±0.16a
Fibra cruda (g/100 g)	3.66 ±0.11b	3.38 ±0.11b	4.59 ±0.13a

Parámetro	Cultivar		
	Rojo	Negro	Cranberry
Densidad aparente (g/ml)	0.556 ±0.016a	0.515 ±0.017a	0.539 ±0.021a
Absorción de agua (g/g harina)	2.25 ±0.13a	2.23 ±0.14a	2.41 ±0.21a
Absorción de aceite (g/g harina)	1.52 ±0.11a	1.34 ±0.11ab	1.48 ±0.09ab
Valores de color			
L	61.05 ±0.35a	54.40 ±0.42c	58.10 ±0.14b
a	0.60 ±0.01b	0.75 ±0.02a	0.20 ±0.01c
b	6.25 ±0.07a	2.70 ±0.14c	5.45 ±0.21b
Propiedades espumantes			
Capacidad (mL/100 mL)	45.7 ±1.4a	37.4 ±1.2b	49.6 ±1.8a
Estabilidad (mL/100 mL)	41.2 ±1.8b	39.4 ±1.7b	54.9 ±2.1a
Propiedades de emulsión			
Capacidad (mL/100 mL)	55.0 ±1.8a	45.6 ±1.8b	53.4 ±2.1a
Estabilidad (mL/100 mL)	52.4 ±1.8b	48.2 ±1.7b	52.4 ±2b

Los valores son la media ± desviación estándar. Las medias que comparten las mismas letras en las columnas no son significativamente diferentes entre sí (prueba HSD de Tukey, $p < 0.05$) (Siddiq y col., 2010).

1.6 Extrusión

La extrusión es un proceso de transformación de una materia prima involucrando una serie de operaciones unitarias como mezclar, amasar, cortar, calentar, enfriar,

moldear y formar. Esta técnica provoca que el almidón expansible humedecido y el material proteico se modifiquen variando diversos parámetros en el proceso que permiten preparar un nuevo producto (Liu y col., 2011). Gelatiniza el almidón, degrada la proteína y forma complejos entre los lípidos, el almidón y las proteínas que conducen a los cambios en la microestructura, las características químicas y la forma macroscópica del producto (Hagenimana y col., 2006; Arribas y col., 2017).

Este proceso que utiliza energía térmica y presión se ha vuelto crucial para convertir los ingredientes alimentarios crudos en productos como cereales para el desayuno, bocadillos salados, pan de molde crujiente, harinas pre-cocidas, alimentos para bebés a base de cereales y proteínas de textura (Dalbhagat y col., 2019).

La extrusión se puede clasificar como extrusión en caliente y en frío según el método de operación y el tipo de construcción, es decir, una extrusora de tornillo simple o doble (Mishra y col., 2012). En la cocción por extrusión o extrusión en caliente, la energía térmica se puede agregar al producto extruido durante el proceso desde una fuente externa o se puede generar por fricción en las superficies internas de la extrusora en contacto con el material extruido. Por el contrario, en la extrusión en frío se bombea a través de un troquel sin la adición de energía térmica externa. En general, la extrusión en frío se utiliza para productos alimenticios como masa de pastelería, piezas individuales de dulces, piezas de pasta, perros calientes y alimentos para mascotas (Singh y col., 2014).

Un sistema de extrusión tiene tres componentes principales (Fig. 2), la sección de alimentación, donde se introducen los diversos ingredientes y se produce la mezcla inicial. La acción de rotación del tornillo transporta los ingredientes a la sección de compresión, donde los ingredientes comienzan el proceso de extruido a medida que la presión y la temperatura comienzan a aumentar. A medida que disminuyen las dimensiones del canal de flujo, el material se comprime y la energía mecánica se disipa a medida que aumenta la temperatura. Finalmente, en la sección de medición (o cocción), se produce una compresión adicional del producto extruido como resultado de reducciones adicionales en las dimensiones del canal de flujo y una mayor acción de cizallamiento (Singh y col., 2014).

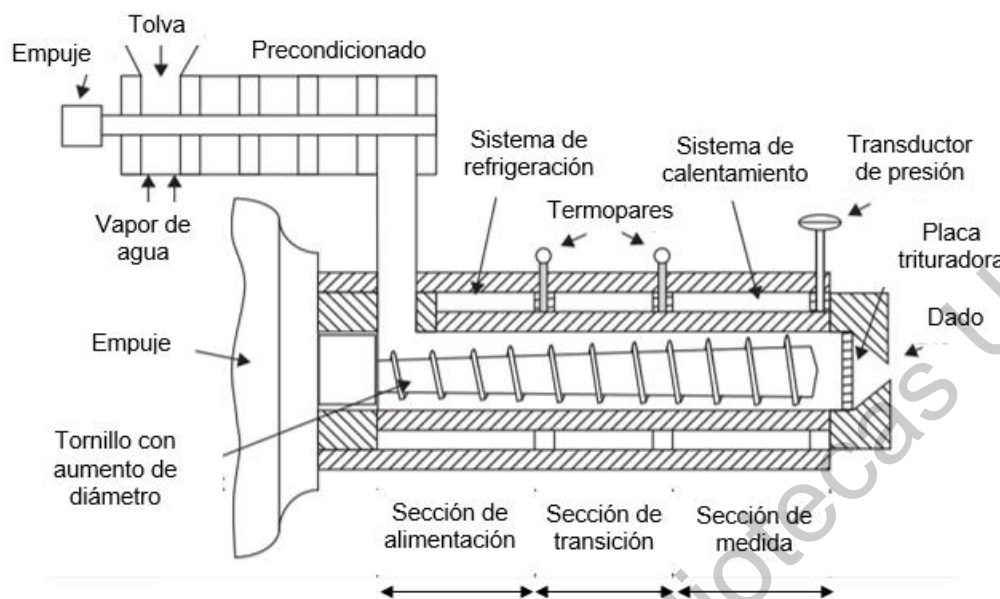


Figura 2. Diagrama de un extrusor (Adaptado de Harper, 1989)

1.6.1 Extrusión de frijol

La extrusión se ha utilizado para procesar muchas leguminosas debido a su alta productividad, bajos costos operativos y tiempos de cocción más cortos (Gulati y col., 2018). Además, se utiliza ampliamente para incorporar semillas difíciles de cocinar en los cereales, que luego se usan para producir harinas pre-cocidas, alimentos infantiles y bocadillos expandidos. Estos productos extruidos tienen ventajas en términos de sus características sensoriales (textura, sabor, olor y color) y propiedades nutricionales al mejorar la biodisponibilidad de los elementos minerales y la reducción de compuestos antinutricionales (Alonso y col., 2001).

Durante la extrusión, la desnaturalización provoca la ruptura de los puentes de hidrógeno y los enlaces disulfuro responsables de las estructuras secundarias y terciarias de las proteínas. El proceso térmico de la extrusión mejora la digestibilidad al eliminar o reducir el contenido de factores antinutricionales como el ácido fítico, los taninos y los polifenoles, así como los inhibidores de tripsina y la quimotripsina (Alonso y col., 2001). De igual forma, existe mayor susceptibilidad del almidón a las enzimas después de la extrusión, que es causada principalmente por la

gelatinización del almidón, aunque la inactivación de los inhibidores enzimáticos también influye en la digestibilidad. Finalmente, la degradación macromolecular de la fibra por extrusión aumenta su solubilidad y cambia sus efectos fisiológicos (Lue y col., 1991); sin embargo, en ocasiones el uso de altas temperaturas puede llevar a propiedades funcionales y sensoriales indeseables de las harinas de frijol. Se ha demostrado que la extrusión a alta temperatura afecta las propiedades funcionales y nutricionales, es decir, la relación de expansión, la densidad aparente, el índice de absorción y solubilidad del agua y la solubilidad de las proteínas. El calentamiento intenso y el estrés por cizallamiento aplicado a las harinas pueden producir una digestión de proteínas limitada y la disponibilidad de aminoácidos. Los duros procesos de extrusión también resultan en la generación de sabores y aromas no deseados (Brummer y col., 2015).

1.7 Calentamiento óhmico

El calentamiento óhmico es una tecnología reciente en el procesamiento de alimentos prometedora para la industria, ya que posee el potencial para reemplazar los procesos de cocimiento convencionales. Este calentamiento se produce cuando una corriente eléctrica alterna pasa a través de un alimento, provocando un aumento de la temperatura en su interior como resultado de la resistencia que ofrece el material al paso de la corriente eléctrica (efecto Joule) (Figura 3). La corriente y el voltaje aplicados son parámetros directamente relacionados a la cantidad de calor generado (Sastray y col., 1996). El calentamiento es rápido y uniforme, sin embargo, la intensidad de campo eléctrico dada depende de la resistencia eléctrica del alimento que se procesa. Factores como la cantidad de agua y iones, la forma y tamaño de partícula, la viscosidad del alimento, entre otros, deben ser considerados antes de llevarse a cabo este proceso (Camargo y col., 2010). A pesar de esto, existen estudios que demuestran la ventaja que hay del uso del calentamiento óhmico con respecto al calentamiento convencional en la industria (Gaytán-Martínez y col., 2012). La disminución del tiempo de procesamiento, la uniformidad en la distribución del calor en el alimento, la eficiencia energética del 90% y el hecho de

que sea una tecnología amigable con el ambiente (Skudder, 1988; Kim y col., 1996; De Hallux y col., 2005), ha permitido su aplicación, sobre otros procesos, en varios procedimientos en la industria de los alimentos, tales como el escaldado, pasteurización, esterilización, descongelación, evaporación, deshidratación, fermentación y extracción (Halden y col., 1990; Wang y col., 1993; Simpson y col., 2007; Camargo y col., 2010).

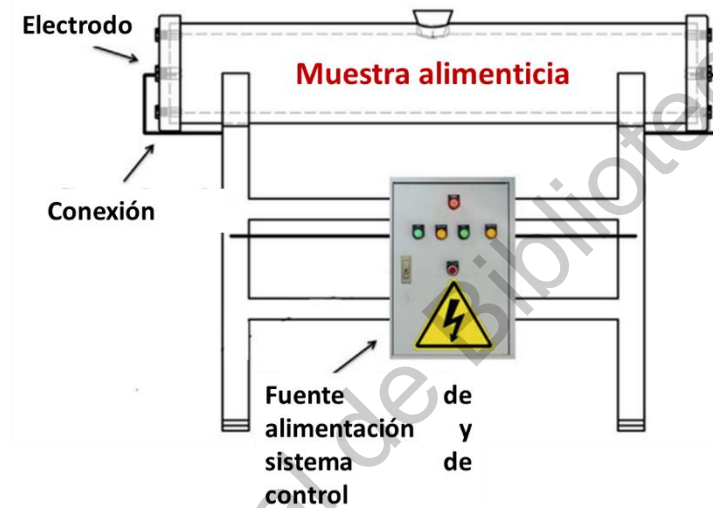


Figura 3. Diagrama esquemático que muestra el principio de calentamiento óhmico (Gavahian y col., 2019)

1.7.1 Procesamiento de frijol por calentamiento óhmico

En un estudio realizado por García-Mier (2009) mostró que el calentamiento óhmico tiene la capacidad de reducir el contenido de taninos en harinas de frijol, independiente de la variedad de este, permitiendo así obtener harinas de frijol cocidas con diferentes porcentajes en contenido de taninos, que no sólo representan un alimento nutritivo, debido a que el contenido nutricional permanece inalterado después del tratamiento, sino también nutracéutico.

Además, para obtener un producto cocido por este método, según este estudio, se necesitan 90 minutos, considerablemente más bajo a lo reportado por el método tradicional, que comprende entre los 120 y 150 minutos para tener un resultado

similar. En general, se puede tener un material cocido con una cantidad de taninos similar a la que se tiene por cocción tradicional, pero en un menor tiempo.

El calentamiento óhmico es una tecnología prometedora para la producción de harinas de frijol debido a la conservación de sus constituyentes nutricionales, así como a la posible inactivación de factores antinutricios, debido al control exacto sobre el tiempo, temperatura y humedad de cocimiento (García-Mier, 2009).

Dirección General de Bibliotecas UAG

2 HIPÓTESIS

El proceso por calentamiento óhmico puede modificar las propiedades tecnofuncionales de la harina de frijol y disminuir los compuestos antinutricios.

3 OBJETIVOS

3.1 General

Evaluar y comparar las propiedades tecno-funcionales y compuestos antinutricios de la harina de frijol procesada mediante calentamiento óhmico, extrusión y cocción tradicional.

3.2 Específicos

- Determinar los parámetros de proceso para obtener harinas procesadas por calentamiento óhmico
- Comparar las características tecno-funcionales de las harinas procesadas por calentamiento óhmico, extrusión y cocción tradicional.
- Evaluar el efecto del calentamiento óhmico en el contenido de compuestos antinutricios de las harinas y compararlas con extrusión y cocción tradicional.

4 METODOLOGÍA

4.1 Materiales y Reactivos

4.1.1 Material biológico

Se usaron semillas de frijol común negro (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad San Luis, cosecha 2017 de Zacatecas, México

4.1.2 Reactivos

Se utilizó ácido sulfúrico, hidróxido de sodio, cloruro de sodio, cloruro de calcio, fosfato de potasio, ácido acético glacial obtenidos de la marca J.T. Baker, kit Pierce TM BCA Protein assay (Thermo, Scientific), BAPNA (N- α -benzoyl-arginine-p-nitroanilide), Proteasa tipo XIV bacterial, lectina de *Phaseolus vulgaris* L., tripsina de suero bovino, de la marca Sigma-Aldrich Chemical. El aceite vegetal fue adquirido en un supermercado local.

4.2 Métodos

4.2.1 Obtención de harina por cocción tradicional

La cocción se llevó a cabo según la metodología de Moreno-Jiménez y col. (2015) con modificaciones. Se colocaron 50 g de frijoles en un vaso de precipitados con 250 mL de agua destilada y se hirvieron durante 2 h. Se drenó y se dejó secar a 50 °C durante 48 h. Posteriormente se molió la muestra usando un molino de café marca

Krups de acero inoxidable (modelo GX410011V) y el producto se pasó por una malla No.60.

4.2.2 Obtención del extruido de frijol

El método de extrusión se realizó basado en la metodología de Sánchez-Quezada (2018) con modificaciones. Se utilizó un extrusor de acero inoxidable 304 de tornillo sencillo con una relación de compresión 1:1; relación L/D= 20 con diámetro de 1 pulgada acoplado de un dado con un orificio de 5 mm a una velocidad de 10 rpm con una temperatura de 120 °C.

Los extrudidos se deshidrataron a una temperatura de 60°C durante 48 h. Posteriormente se molieron usando un molino de café marca Krups de acero inoxidable (modelo GX410011V) y el producto se pasó por una malla No.60.

4.2.3 Obtención de harina por calentamiento óhmico

Se empleó una celda de Nylamide con electrodos de acero inoxidable, con una capacidad aproximada de 150 g con control de temperatura (patente: MX/a/2007/016261) (Figura 4). El frijol entero se calentó óhmicamente con una potencial de 60 V a diferentes tiempos y temperaturas (10 y 15 min; 100 y 110 °C). La temperatura se midió por medio de un termopar tipo T aislado y el control de tiempo y de temperatura se hizo con un controlador de temperatura programable en rampa Watlow modelo 981 (Watlow Electric Manufacturing Co., St Louis, MO). Después las muestras se secaron a 50°C por 48 horas para finalmente molerse en un molino de café marca Krups de acero inoxidable (modelo GX410011V) y pasarse por una malla No. 60. Las muestras obtenidas y la condición se indican en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Condiciones de calentamiento óhmico para cada harina

Harina	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
H1	100	10
H2	100	15
H3	110	10
H4	110	15



Figura 4. Sistema utilizado para proceso de calentamiento óhmico

4.2.4 Análisis proximal

Se usaron los métodos de la AOAC (2002): grasa (920.39), proteína (954.01), humedad (925.09B) y cenizas (923.03) y carbohidratos por diferencia de los anteriores.

4.2.4.1 Grasa (método 920.39)

Dentro de un cartucho de celulosa se colocó 1 g de la harina, se colocó un tapón de algodón y se colocó en el compartimiento de extracción Soxhlet. Éste se ensambló a un matraz receptor (previo al ensayo se puso a peso constante y se registró su peso inicial) el cual contenía 200 mL de éter de petróleo y a un refrigerante. A continuación el matraz que contenía el solvente se colocó sobre una parrilla de calentamiento hasta su punto de ebullición y el calentamiento se ajustó a 10 reflujos por hora durante 5 horas. Terminado el tiempo el matraz se retiró y se recuperó el solvente por destilación. El matraz se colocó dentro de una estufa a 60 °C para la completa eliminación de solvente y humedad, con el fin de obtener únicamente el peso de la fracción lipídica. Los matraces se pesaron y la diferencia de peso final y del matraz previo a la extracción se registró para obtener el porcentaje de grasa (AOAC, 2002).

4.2.4.2 Proteína (método 954.01)

Se determinó en el sistema Kjeldhal. Se colocaron 0.5 g de muestra en un matraz de digestión Kjeldhal (AOAC, 2002). A cada matraz se agregó una tableta de catalizadores (sulfato de sodio y sulfato de cobre), Se agregaron 10 ml de ácido sulfúrico concentrado y los tubos se colocaron en una parrilla de digestión a 450 °C hasta que el contenido se tornó verde turquesa. Una vez fríos, a cada tubo se le agregaron 100 ml de agua destilada y se colocaron uno a uno en el destilador, donde se además se colocó un matraz Erlenmeyer de 250 ml conteniendo 25 ml de ácido bórico conteniendo los indicadores. El destilado recibido en el matraz ya mencionado se tituló con ácido clorhídrico 0.1 N. Se determinó el nitrógeno total (N) multiplicado por un factor de conversión equivalente al porcentaje de proteína presente en el alimento, en este caso 5.71.

4.2.4.3 Cenizas (método 945.46)

Se colocó 2 g de muestra en un crisol de porcelana (previamente puesto a peso constante y registrado su peso inicial). La muestra se secó primero durante tres horas

a 110 °C, posteriormente se calcinó en una parrilla de calentamiento dentro de una campana de extracción hasta que dejaron de salir vapores de la misma. Posteriormente el crisol se colocó dentro de una mufla a temperatura de 550 °C durante 3 horas. Una vez fría la muestra ésta se pesó y se determinó el porcentaje de cenizas (AOAC, 2002).

4.2.4.4 Humedad (método 925.09B)

Se pesó 1 g de la harina en un crisol previamente colocado a peso constante y pesado. El crisol se colocó en una estufa a 130°C durante 3 h. Al término de las mismas el crisol se dejó enfriar dentro de un desecador y posteriormente se pesó y se colocó en un desecador a temperatura ambiente. Una vez fría la muestra se pesó y se determinó el porcentaje de humedad (AOAC, 2002).

4.2.5 Determinación de parámetros fisicoquímicos de la harina

4.2.5.1 Índice de absorción de agua

El índice de absorción de agua se determinó utilizando el método descrito por Ramírez-Jiménez y col. (2014). Se suspendieron 5 g de harina deshidratada en 30 ml de agua destilada en un tubo de centrífuga pesado con anterioridad de 50 ml, se vortexeo durante 1 min y se centrifugó a 3000 g durante 10 min a 25°C. El líquido sobrenadante se desechó y se drenaron los tubos durante 10 minutos en una toalla de papel. Se pesó la muestra para el cálculo y el resultado se expresa como gramos de agua retenida por gramo de sólido seco (g / g).

4.2.5.2 Capacidad de absorción de aceite

La capacidad de absorción de aceite se determinó según Ramírez-Jiménez y col. (2014) con ligeras modificaciones. A 1 g de harina de frijol deshidratada se le agregaron 10 ml de aceite vegetal en un tubo de centrífuga de 50 ml previamente pesado. La suspensión se agitó durante 2 minutos, se dejó reposar a 28°C durante

30 minutos y luego se centrifugó a 15000 g durante 20 minutos. Se decantó y desechó el sobrenadante. Las gotas de aceite adheridas en el tubo de centrifugación se removieron con algodón y posteriormente se pesó el tubo.

El resultado se calcula y expresa como el peso de aceite absorbido por gramo de harina.

4.2.5.3 Viscosidad

La viscosidad se determinó de acuerdo a lo reportado por Gaytán-Martínez y col. (2012) utilizando un analizador de viscosidad. Se ajustó el contenido de humedad de la harina al 14% (en base húmeda). Se pesaron 4 g de muestra y se adicionó agua destilada hasta obtener 28 g de peso final. Los ciclos de calentamiento y enfriamiento se iniciaron a una temperatura de 50°C, durante 1 min y posteriormente se elevó la temperatura paulatinamente 7.5°C/min hasta alcanzar 92°C, donde permaneció durante 5 min y luego se enfrió (igualmente a 7.5°C/min) hasta alcanzar los 50°C donde se mantuvo 1 min. De la curva obtenida se identificó la temperatura de pastado (°C), la viscosidad máxima y la viscosidad final en Pascal por segundo (Pa/s).

4.2.5.4 Capacidad emulsificante

La determinación de la capacidad emulsificante se llevó a cabo de acuerdo a la metodología propuesta por Granito y col. (2004). Se mezcló 1 g de muestra con 20 ml de agua, se agitó durante 15 min, se ajustó el pH a 7 y se llevó a 25 mL con agua destilada. Posteriormente se mezclaron 25 mL de esta solución con 25 mL aceite de maíz en una licuadora por 3 min y se centrifugaron a 1300g por 5 min. La emulsión se expresa en términos de porcentaje, como la altura de la capa emulsificada con respecto al total del líquido.

4.2.5.5 Capacidad espumante y estabilidad de la espuma

Esta sección se realizó según lo reportado por Granito y col. (2004). Se mezclaron 2 g de muestra con 100 mL de agua por 5 min a máxima velocidad en una licuadora.

Transcurrido este tiempo, se transfirieron a una probeta y se midió el volumen final a los 30 s. La capacidad espumante se expresa como el porcentaje de aumento en volumen. La estabilidad de la espuma se midió en intervalos de tiempo de 0, 30, 60, y 120 min.

4.2.5.6 Capacidad de gelificación

La capacidad de gelificación se llevó a cabo mediante la metodología de Granito y col. (2004). Se prepararon suspensiones al 4, 8, 12 y 14% (p/v) en agua destilada, se tomaron 5 ml en tubos de ensayo, se colocaron en baño caliente a 100°C por 1h y posteriormente en un baño de hielo durante 1 h. La gelificación se determinó como la menor concentración a la cual la muestra del tubo invertido no cae o se desliza.

4.2.6 Determinación de factores antinutricios

4.2.6.1 Cuantificación de inhibidores de tripsina

La cuantificación de inhibidores de tripsina se realizó mediante la técnica propuesta por Kakade y col. (1974). Se tomó 1 g de la harina extrudida de frijol y se adicionaron 50 ml de NaOH 0.01 N con mezclado continuo durante 3 horas. Una vez extraído, se hizo un ajuste de pH a 8.2 con HCl 0.1 N y se centrifugó a 3000 g durante 10 minutos. Se tomaron 5 ml del sobrenadante y se le adicionaron 15 mL de agua destilada para obtener un extracto 1:4 con menor turbidez. De esta dilución se tomó una alícuota de 500 µl para el tubo muestra y otros 500 µl para el blanco. Posteriormente se hicieron diluciones sucesivas tomando 250 µl del tubo de muestra más 250 µl de agua destilada para obtener una dilución 1:8 y se repitió el procedimiento hasta obtener diluciones 1:16, 1:32, 1:64. Los blancos de muestra se trataron de la misma forma.

A cada tubo muestra diluida se le adicionaron 250 µl de tripsina y se dejaron reposar durante 5 minutos. Enseguida se agregaron 625 µl de BAPNA (N- α -benzoyl-arginine-p-nitroanilide) y se dejaron incubar a 37 °C durante 10 minutos. Posterior a esto, se detuvo la reacción adicionando 125 µl de ácido acético al 30%.

Para los blancos, se agregaron 250 µl de tripsina más 125 µl de ácido acético al 30% a cada dilución, se mezclaron y añadieron 2.5 ml de BAPNA. Uno de los tubos se utilizó como control de máxima absorbancia colocando 250 µl de agua destilada más 250 µl de tripsina. Se dejó en reposo durante 5 minutos y enseguida se adicionaron 625 µl de BAPNA. Finalmente se incubó a 37 °C y se le agregaron 125 µl de ácido acético al 30%.

Para el blanco de análisis se preparó un tubo de absorbancia cero, mezclando 250 µl de agua destilada más 250 µl de tripsina, 125 µl de ácido acético al 30 % y 625 µl de BAPNA, respetando el orden de adición de los reactivos. En una microplaca de 96 pozos se colocaron 250 µl de cada muestra. Por último, la absorbancia se midió a 410 nm. Los resultados están expresados como unidades inhibidas de tripsina (UIT) por miligramo de muestra según la siguiente fórmula:

$$UIT = \frac{[\text{Tubo abs máx} - (\text{Tubo muestra} - \text{Tubo bco muestra})] \times FD}{0.01}$$

4.2.6.2 Cuantificación de lectinas

Se realizó una extracción de las lectinas en la harina usando una solución amortiguadora de fosfatos (K_2HPO_4 5mM y 0.15 M de NaCl pH 7.4). A 0.1 g de harina de frijol se le agregaron 10 mL de solución amortiguadora de fosfatos y se dejaron en agitación continua durante 18 horas. Después la mezcla se centrifugó a 12 000 g y el sobrenadante se utilizó para el ensayo de hemaglutinación usado por Reynoso-Camacho y col. (2003).

En un tubo con heparina se tomó una muestra de sangre (cuidando que sea fresca y siempre de la misma fuente) de donde se tomó 1 mL y se agregaron 13 mL de solución amortiguadora de fosfatos. Los eritrocitos se lavaron dos veces con la misma solución y entre cada lavado se recuperaron los eritrocitos mediante centrifugación a 3000 rpm durante 10 minutos. Posteriormente se hizo una solución al 4% de eritrocitos, se le añadieron 1mL de solución de proteasa al 0.2% y se

incubaron a 37 °C por una hora. Al finalizar la hora, se resuspendieron los eritrocitos y se lavaron tres veces más. Se hizo una nueva dilución al 4% en solución amortiguadora.

Posteriormente, en una placa de 96 pozos con fondo cónico se añadieron 50 µl del extracto de harina de frijol, usando como control positivo lectina de *Phaseolus vulgaris* L. al 0.2% en solución amortiguadora y como control negativo solución amortiguadora. Se hicieron diluciones del orden 2 con la solución amortiguadora para las muestras y los controles. A cada pozo se le agregaron 50 µl de la solución de eritrocitos. Posterior a esto, se dejó la placa en reposo a temperatura ambiente durante una hora. La actividad hemaglutinante se expresa en unidades de hemaglutinina/mg de proteína. Las unidades de hemaglutinina se definieron como el inverso de la última dilución que presenta aglutinación positiva.

4.2.6.3 Cuantificación de proteínas solubles

El contenido de proteínas solubles se determinó utilizando la metodología Mok y col. (2014) con modificaciones. Las muestras de frijol se desgrasaron previo al análisis con 3 volúmenes de hexano y se agitó (200 rpm) durante 6 min a temperatura ambiente. El hexano se recuperó por centrifugación a 10,000 g durante 20 min a temperatura ambiente. Se repitió este paso dos veces más. Posteriormente se agregó agua destilada en una relación 1:10 (muestra:agua) y se ajustó el pH a 8.5 con NaOH 1 M. Se dejó en agitación por 2 h a temperatura ambiente a 200 rpm y después se centrifugó a 10,000 x g a 4 °C por 20 minutos. A partir de este momento, las muestras se manejaron en hielo.

El sobrenadante se almacenó en refrigeración y al pellet se la agregó agua destilada en una relación 1:5 (muestra:agua), aproximadamente 40 mL a cada muestra. Se agitó por 2 h y se centrifugó a 10,000 g a 4 °C por 20 minutos. El sobrenadante se unió con el anterior y se ajustó el pH a 4.4 para precipitar las proteínas con HCl 1M. Se dejó en agitación 2 h y se centrifugó a 10,000 g a 4 °C por 20 minutos. El pellet se congeló a -80 °C y se liofilizó. Los aislados proteicos se almacenaron a -80 °C.

Se pesaron aproximadamente 2 mg de estos aislados y se cuantificó la concentración de proteínas con el kit Pierce TM BCA Protein assay (Thermo, Scientific).

4.2.6.4 Electroforesis de proteínas

La electroforesis se llevó a cabo según el método de Liu y col. (2008) en gel de dodecil sulfato de sodio y poliacrilamida en un sistema de tampón continuo: tris-HCl 0,375 M, pH 8,8, SDS al 1% (p/v). El tampón de muestra utilizado fue Tris-HCl 0,125 M, pH 6,8, glicerol al 20% (v/v), SDS al 1% (p/v) y azul de bromofenol al 0,05% (p/v); Se añadió 5% (v/v) de 2-mercaptoetanol.

El gel se preparó con un 12% de gel de separación y un 5% de gel de apilamiento. Las corridas se realizaron en una unidad de electroforesis vertical a 20 mA durante 30 min, seguido de 40 mA durante 3 h aproximadamente, con tampón de electrodo [0.025 M Tris – HCl, 0.192 M glicina y 0.1 % (w/v) SDS, pH 8.3], hasta que el tinte de seguimiento migró al borde inferior del gel. Los geles se tiñieron con Coomassie Brilliant Blue R-250 (0.05% p/v) en metanol-ácido acético-agua (25:10:65 v/v/v) y se destiñieron en la misma solución sin el tinte. La cuantificación de las subunidades de proteínas se realizó mediante el uso de un densitómetro de exploración de imágenes y se analizaron con el software correspondiente. La cantidad de proteína relativa de cada subunidad (banda de proteína) de globulinas 11S y 7S se calculó a partir de su área de porcentaje respectiva en los densitogramas frente al área total de fracciones 11S y 7S.

4.3 Diseño experimental

El diseño se llevó a cabo de forma completamente aleatoria. Se evaluó el efecto del voltaje, temperatura y el tiempo como variables independientes al procesar el frijol por calentamiento óhmico. Todas las mediciones se llevaron a cabo como experimentos independientes por duplicado. Los datos se expresan como la media \pm desviación estándar (DS) y se les realizó un análisis ANOVA. La comparación de medias de las propiedades tecno-funcionales de frijol procesado de manera

tradicional, por extrusión y calentamiento óhmico se llevó a cabo mediante una prueba de TukeyHSD ($\alpha=0.05$). Todos los análisis estadísticos se hicieron en el programa JMP® 8.0.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Composición proximal

La composición proximal de la harina de frijol crudo se presenta en el Cuadro 5. Estos resultados difieren con el contenido reportado para el frijol negro en otros estudios, donde indican un promedio del 23%, 3.2%, 4.8% y 70% para proteína, lípidos, cenizas y carbohidratos respectivamente (Siddiq y col., 2010; Castro-Rosas y col., 2015; Santiago-Ramos y col., 2018); sin embargo, estas diferencias pueden ser debidas a la variedad de frijol utilizada (Ramírez-Jiménez y col., 2014).

Cuadro 5. Composición proximal del frijol crudo

Proteína	Lípidos	Cenizas	Humedad	Carbohidratos
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
27.13 ± 0.16	1.44 ± 0.02	4.40 ± 0.15	6.7 ± 0.69	60.33

Los resultados se presentan como la media de las determinaciones \pm DS n=2 en base húmeda

Para la composición proximal se ha demostrado que no se encuentran significativas entre los contenidos de la harina de frijoles crudos y las harinas de frijoles cocidos (TéllezTéllez y col., 2009; Santiago-Ramos y col., 2018), no obstante, el contenido de estas, tienen relación con sus propiedades fisicoquímicas, donde, por ejemplo, el

porcentaje de proteína y grasa de la harina, se correlaciona negativamente con la mayoría de las otras propiedades funcionales estudiadas (Siddiq y col., 2010).

5.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos de la harina de frijol procesadas por calentamiento óhmico y proceso tradicional

5.2.1 Índice de absorción de agua

El índice de absorción de agua de la harina juega un papel importante en el proceso de preparación de alimentos porque influye en sus propiedades funcionales y sensoriales (Ramírez-Jiménez y col., 2014). Esta capacidad está dada por los cambios que ocurren en las proteínas y carbohidratos, ya que estos componentes contienen partes hidrofílicas, como las cadenas laterales polares o cargadas (Wani y col., 2013).

Los resultados del índice de absorción de agua (IAA) de las harinas de frijol procesadas por calentamiento óhmico y proceso tradicional se presentan en la Figura 5. Los valores de IAA son importante cuando se procesan leguminosas, ya que son un indicador de la cocción completo del frijol por ende con la inactivación de los factores antinutricios (Granito & Guerra, 2004). Los resultados para calentamiento óhmico varían en un rango de 2.66 ± 0.04 (100 °C/10 min) a 2.91 ± 0.02 (110 °C/10 min) g de agua/g muestra (Cuadro 6), lo cual concuerda con lo reportado por otros autores (Granito & Guerra, 2004; Ramírez-Jiménez y col., 2014; Siddiq y col., 2013; Wani y col., 2013). El estudio realizado por Ramírez-Jiménez y col. (2014), indica que, valores entre 2.64 a 3.73 g de agua/ g muestra, representan una cocción completa del frijol, lo que permite deducir que todas las muestras procesadas por óhmico tuvieron una cocción correcta. Se encontró que entre tratamientos no se observaron diferencias significativas ($p \geq 0.05$), además de no encontrar diferencias cuando se les compara con los tratamientos convencionales. Igualmente se observó que no existe un impacto del tiempo de procesamiento al procesar frijol para obtener harinas usando calentamiento óhmico. Lo anterior debido que al comparar las

mismas condiciones de temperatura con diferente tiempo (H1-H2 y H3-H4), no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, por lo que el efecto, en este caso, se encuentra dado únicamente por la temperatura. Sumado a esto, al compararlos con el valor obtenido de la harina sin tratamiento (2.31 ± 0.00), resulta un incremento de entre 15 y 29% en la absorción de agua, que representa una diferencia estadísticamente importante.

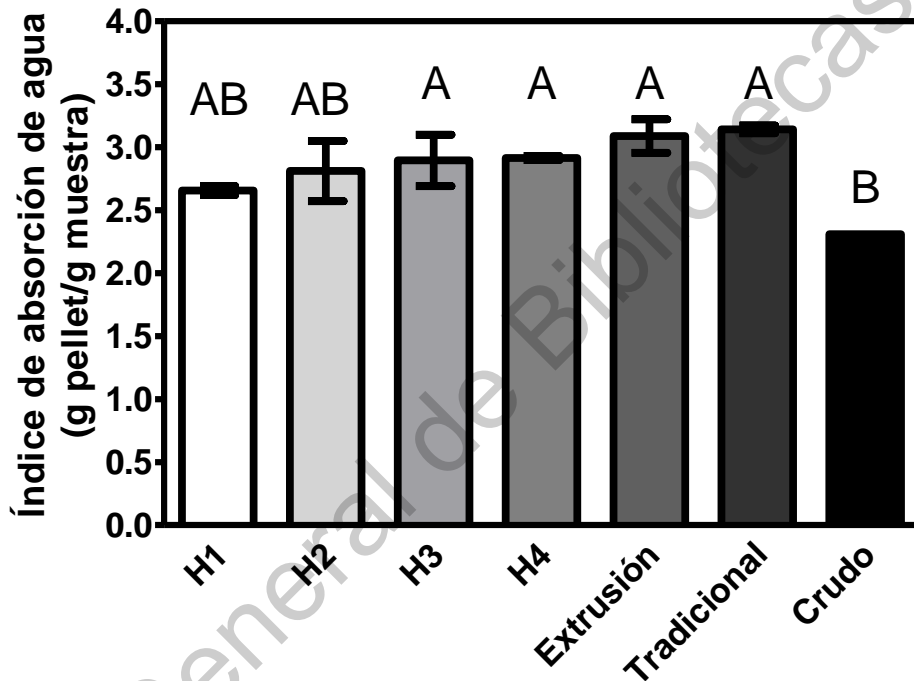


Figura 5. Índice de absorción de agua de las harinas de frijol procesadas por diferentes tratamientos. H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones \pm DS n=2. Para cada tratamiento, letras similares en una misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey.

El incremento en la capacidad de absorción de agua puede ser atribuido a la desnaturalización de las proteínas por efecto del tratamiento térmico, principalmente

de la albúmina, sin afectar considerablemente a las globulinas. Dicha desnaturalización incrementa su accesibilidad como consecuencia de la exposición de los aminoácidos polares presentes, los cuales tienen una gran afinidad por el agua, produciendo un incremento en la capacidad para absorberla (Granito & Guerra, 2004; Ramírez-Jiménez y col., 2014). Adicionalmente, al ser una matriz compleja, la naturaleza hidrofílica de los carbohidratos puede contribuir al incremento del IAA, por la gelatinización del almidón y el hinchamiento de la fibra dietética, cuando las muestras son sometidas a cocción (Granito & Guerra, 2004, Du y col., 2014).

La capacidad de absorción de agua es importante para ciertas características del producto, como su humedad, la retrogradación del almidón y el posterior envejecimiento; además de ser fundamental en la formulación de alimentos viscosos tales como sopas, salsas, masas y productos horneados, donde se requiere una buena interacción proteína-agua, la cual tiene un impacto en el producto terminado (Marquezi y col., 2016)

5.3 Capacidad de absorción de aceite

La capacidad de absorción de aceite de harinas de leguminosas es importante para mejorar la textura de la boca y mantener el sabor de los productos alimenticios. Las proteínas hidrofóbicas tiene el papel más importante en este atributo, que está influenciado por el tamaño de las partículas, el contenido de almidón y proteínas, los tipos de proteínas y las relaciones de cadena lateral de aminoácidos no polares en la superficie de la molécula proteica (Du y col., 2014).

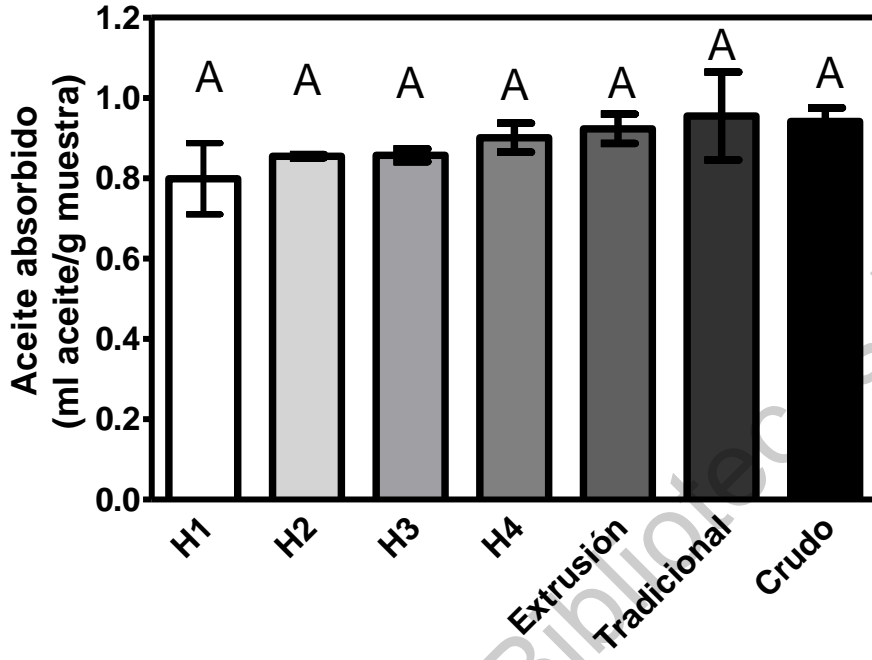


Figura 6. Capacidad de absorción de aceite de las harinas de frijol procesadas por diferentes tratamientos. H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones \pm DS n=2. Para cada tratamiento, letras similares en una misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey.

Los valores de las harinas por calentamiento óhmico variaron entre 0.80 ± 0.09 y 0.90 ± 0.04 mL aceite/g de muestra (Figura 6). Estos resultados difieren de lo reportado en otros estudios (Gamboa-Gómez y col., 2015; Alves y col., 2019); sin embargo, en estos hubo una cocción y deshidratación del frijol de forma tradicional, además de haber un proceso de fermentación de por medio. La actividad enzimática puede causar cambios en las proteínas, y luego exponer sus porciones hidrofóbicas y permitir la interacción con los lípidos, fomentando este fenómeno. No obstante, los resultados concuerdan con lo obtenido por Ramírez-Jiménez y col. (2014) en donde la absorción de aceite varió de 0.76 a 0.88 mL / g. Lo que sugiere que el

procesamiento por calentamiento óhmico puede ayudar a la disminución de la absorción de aceite en harina, lo cual es una cualidad deseable, ya que puede ser una tecnología alternativa a la deshidratación, para obtener productos fritos reducidos en grasas. Asimismo, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, donde nuevamente, no se vio un efecto del tiempo como variable del procesamiento. La harina H4 (110 °C/15 min) mostró el valor con menor diferencia con respecto a los tratamientos comúnmente utilizados. Sin embargo, no hubo diferencias entre el producto crudo y el procesado por calentamiento óhmico, a excepción de la harina H3 (110 °C/10 min) que tuvo la mayor absorción.

La capacidad de absorción de aceite es producto del atrapamiento físico de las grasas por parte de las proteínas, a través de la formación de estructuras denominadas micelas (Granito & Guerra, 2004). El tratamiento térmico puede causar cambios en las proteínas, de sus porciones hidrofóbicas y permitir la interacción con los lípidos. Las interacciones almidón-proteína, pueden influir en el fenómeno de la disminución de absorción de aceite. Según esta sugerencia, se puede decir que hay una menor cantidad de cadenas laterales no polares disponibles en las moléculas de proteína de la harina (Ramírez-Jiménez y col., 2014), lo que disminuye su capacidad para unirse a la grasa. Esta capacidad de las proteínas de enlazar lípidos, además de ser importante para la formulación de productos para freír y para la retención de los sabores, disminuye el desarrollo de la rancidez oxidativa y en consecuencia aumenta la estabilidad durante el almacenamiento (Du y col., 2014).

5.4 Capacidad emulsificante

El equilibrio hidrofílico/hidrofóbico de los aminoácidos en una proteína, particularmente en su superficie, puede influir en la capacidad emulsificante, además de los carbohidratos, especialmente el almidón y la fibra, que también pueden ayudar a atrapar y aglutinar con aceite y/o agua, contribuyendo a la capacidad emulsificante (Gupta y col., 2018). En la interfase aceite-agua, la proteína orienta los residuos lipófilos a la fase oleosa y los residuos hidrófilos a la fase acuosa, reduciendo así la

tensión superficial en la interfase. Teóricamente, un aumento de la solubilidad de la proteína facilita la interacción entre las fases oleosa y acuosa (Sánchez-Mendoza y col., 2017).

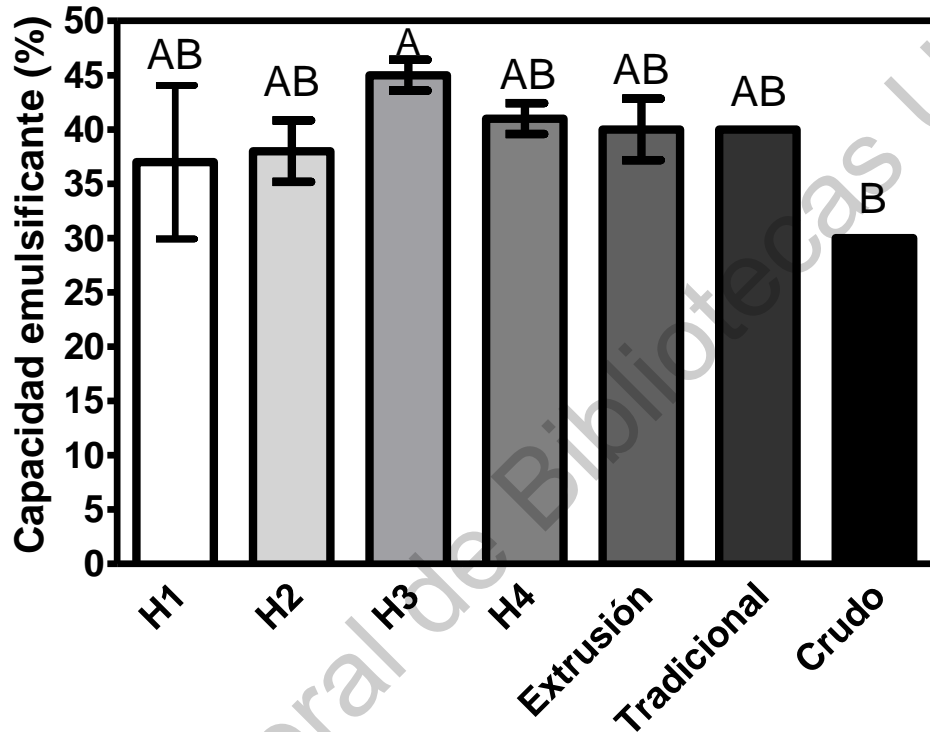


Figura 7. Capacidad emulsificante de las harinas de frijol procesadas con diferentes tratamientos. H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones \pm DS n=2. Para cada tratamiento, letras similares no presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey.

Para calentamiento óhmico se obtuvo un rango de 34 a 45% de capacidad emulsificante (Figura 7). Estos resultados concuerdan con lo obtenido por otros autores (Alves y col., 2019; Siddiq y col., 2010), donde se presentan rangos entre 42-45%. De igual forma, no se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos convencionales y calentamiento óhmico ($p \geq 0.05$), donde la harina H3

(110 °C/10 min) obtuvo el mayor porcentaje de emulsificación; sin embargo, cuando se usa como control el material crudo, esta es la que presenta diferencias significativas ($p \leq 0.05$) respecto a la harina sin tratamiento. A pesar de que la estructura compacta y rígida de las globulinas, principal fracción proteica de frijol, no las hace proteínas con un buen potencial para funciones emulsificantes/espumantes en el producto crudo (Sathe, 2002), los resultados encontrados señalan que las muestras procesadas por calentamiento óhmico tienen la capacidad de desarrollar y mejorar esta propiedad. Aun cuando este efecto está dado principalmente por las proteínas, que disminuyen la tensión superficial de la gota de aceite (Sikorski, 2002), la presencia de algunos polisacáridos pueden igualmente estar teniendo un efecto, ayudando a estabilizar la emulsión al aumentar la viscosidad del sistema (Dickinson, 1994).

Este parámetro para las harinas es crítico para su aplicación en productos de panadería, incluidos pasteles, panes y muffins, además de productos batidos y salsas emulsionadas tales como la mayonesa, postres congelados y embutidos (Granito & Guerra, 2004; Foschia y col., 2017).

5.5 Capacidad espumante

La capacidad espumante y su estabilidad dependen de dos propiedades moleculares. La primera se ve afectada por la velocidad de adsorción, la flexibilidad y la hidrofobia; la estabilidad de la espuma depende de las propiedades reológicas de la película proteica. La proteína de los alimentos está formada por mezclas de diversas especies moleculares; por ello, sus propiedades espumantes son determinadas por la interacción entre los componentes proteicos en la interfase (Fennema, 2000).

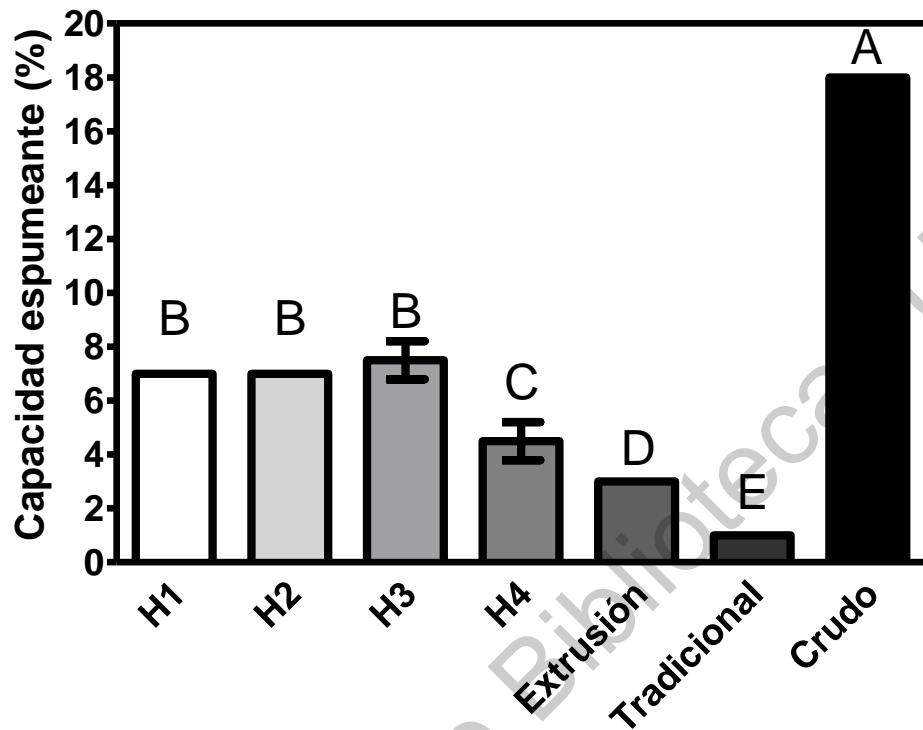


Figura 8. Capacidad espumeante de las harinas de frijol procesadas por diferentes tratamientos H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones \pm DS n=2. Para cada tratamiento, letras similares no presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey.

La Figura 8 muestra los resultados obtenidos para la capacidad espumante, donde se tiene un rango que va del 5 al 7% para esta capacidad, resultante del calentamiento óhmico. Se observó que el procesamiento óhmico tuvo un incremento de este parámetro, encontrando diferencias significativas con respecto al producto crudo y los procesados por los métodos convencionales. Este fenómeno también se observó en el estudio realizado por Granito & Guerra (2004), donde la capacidad espumante en granos sometidos a tratamiento térmico en relación a los crudos disminuyó.

Aun cuando se ha reportado en otros estudios las buenas propiedades espumantes de las harinas de frijol (Sánchez-Mendoza y col., 2017; Siddiq y col., 2010; Wani y col., 2013) el tratamiento térmico parece afectar esta propiedad de forma negativa. Esto puede deberse al rango de temperatura utilizado, ya que hay reportes que indican que a altas temperaturas (80 y 120°C) se desnaturalizan las albúminas, permaneciendo solamente las globulinas poco afectadas, que junto con el método de generación de espuma (batido a altas velocidades) puede disminuir el poder espumante de las harinas de frijoles tratadas, debido a la agregación y precipitación de las proteínas (Fennema, 2000).

Cuadro 6. Estabilidad de la espuma (%) de las harinas de frijol procesadas con diferentes tratamientos

Muestra	30'	60'	120'
H1	6.5±0.71 ^b	6±0.00 ^b	6±0.00 ^b
H2	6±0.00 ^b	6±0.00 ^b	5.5±0.71 ^b
H3	6±0.00 ^b	5.5±0.71 ^b	5±0.00 ^b ^c
H4	5±0.00 ^c	3.5±0.71 ^c	3±0.00 ^c
*Extrusión	1±0.00 ^d	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^d
*Tradicional	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^d
Crudo	15±0.00 ^a	13.5±0.71 ^a	13±51.41 ^a

H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones ±DS n=2. Para cada tratamiento, letras similares en una misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey. Los tratamientos marcados con asterisco son aquellos que mostraron diferencias con respecto a su capacidad espumante inicial.

En el Cuadro 6 se muestran los datos obtenidos para la prueba de estabilidad de la espuma, donde se encontraron diferencias entre los tratamientos en cada uno de los tiempos medidos. El calentamiento óhmico, además de presentar volúmenes más

altos de espuma, esta no disminuye a lo largo del tiempo de forma considerable, contrario a los otros dos métodos.

Si bien, como se ha mencionado antes para la capacidad y la estabilidad de la espuma se ve comprometida con el procesamiento térmico, comparando resultados con otros estudios, el calentamiento óhmico nos permite conservar esta capacidad a lo largo del tiempo, ya que, por ejemplo, en el trabajo realizado por Granito & Guerra (2004), el calor aplicado para la cocción provocó una disminución y/o eliminación de este parámetro.

Las propiedades espumantes dependen de las proteínas y algunos otros componentes, como los carbohidratos, que están presentes en las harinas (Sreerama y col., 2012). Sus características son parámetros importantes cuando se desarrollan formulaciones para productos de panadería (Siddiq y col., 2010).

5.6 Capacidad gelificante

Las propiedades de gelificación observadas para las harinas de frijol procesadas por los diferentes métodos a distintas concentraciones de la harina (4-14%) en las dispersiones se muestran en el Cuadro 7. Se observó que la gelificación para todas las harinas procesadas por óhmico comenzó a una concentración del 4%, observándose la gelificación completa al 8% para cada una de ellas, teniendo un comportamiento similar al proceso de extrusión y teniendo una concentración más baja al producto crudo. Estos resultados mostraron gelificación a concentraciones más bajas a las reportadas por otros estudios (Granito y col., 2004; Siddiq y col., 2010) donde la concentración de gelificación mínima se encuentra en una concentración del 12% para harinas a las que se les aplicó algún proceso térmico.

Cuadro 7. Capacidad de gelificación de las harinas de frijol procesadas con diferentes tratamientos

Muestra	Concentración de suspensiones			
	4%	8%	12%	14%
H1	-	X	X	X
H2	-	X	X	X
H3	-	X	X	X
H4	-	X	X	X
Extrusión	-	X	X	X
Tradicional	X	X	X	X
Crudo	-	-	X	X

H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. X: gelificación complete, -: no gelificación.

Estos geles de proteínas están compuestos por matrices tridimensionales o redes de polipéptidos entrelazados y parcialmente asociados en los que queda atrapada el agua. Su formación generalmente requiere de calentamiento previo, para causar al menos una desnaturalización parcial o el despliegue de las cadenas de polipéptidos (Coffman y García, 1977). En las leguminosas, este fenómeno se le atribuye principalmente a la fracción de globulina. Esto explica porque se da una gelificación a menor concentración en las harinas procesadas en comparación al producto crudo.

La gelificación es una de las propiedades tecno-funcionales más importantes que determinan la idoneidad de la incorporación de algún material en productos alimenticios, debido a que la capacidad de la proteína de formar geles proporciona a la matriz la facilidad de retener agua, sabores, azúcares e ingredientes alimentarios (Kinsella, 1979).

5.7 Viscosidad

El análisis de la viscosidad es un método eficaz para medir las propiedades viscosas del almidón cocido del producto y relacionar la funcionalidad con las propiedades estructurales para su posterior uso en la industria alimentaria como espesante, aglutinante u otros usos, que dependen de la viscosidad de la pasta. El perfil de las harinas crudas y procesadas se muestra en la Figura 9.

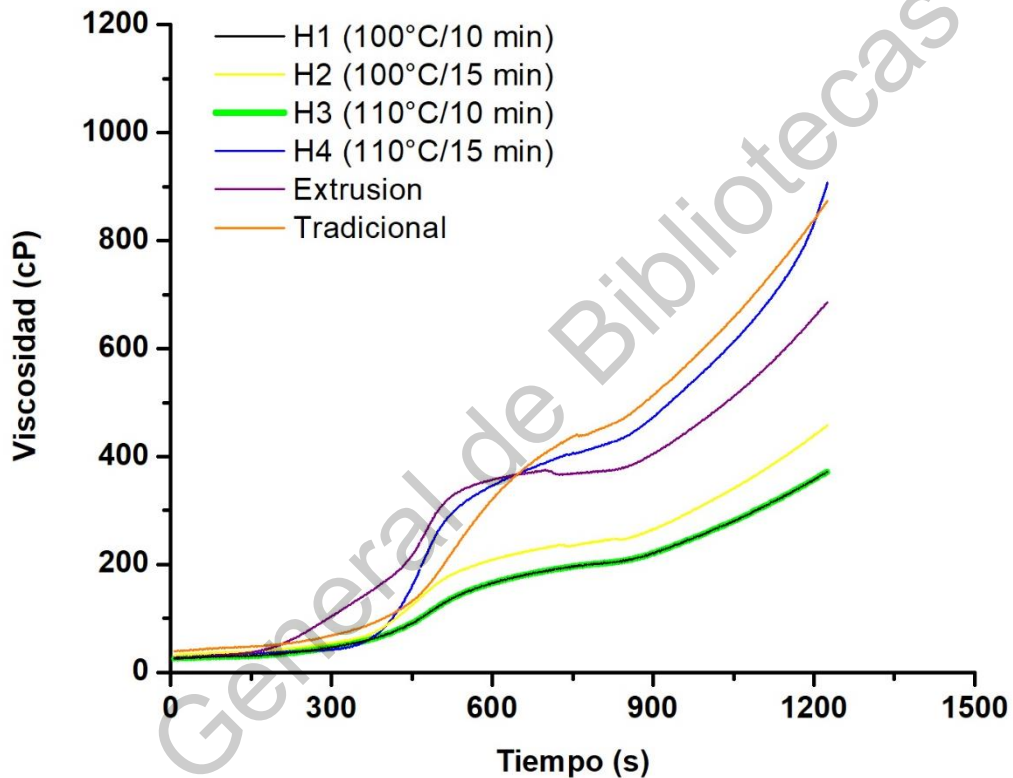


Figura 9. Viscoamilograma de las harinas de frijol procesadas por los diferentes tratamientos térmicos

Las propiedades viscoamilográficas de las harinas de frijol mostraron diferentes perfiles, dependientes del procesamiento térmico, sin embargo, todas las harinas mostraron un aumento gradual de la viscosidad con el aumento de la temperatura, que puede deberse a que los gránulos de almidón gelatinizados y otros compuestos,

como proteínas y fibra, pueden haber contribuido a la estabilidad de la pasta (Marquezi y col., 2016).

Cuadro 8. Propiedades de pasta de harina de frijol crudo y procesado

	Viscosidad máxima (cP)	Viscosidad mínima (cP)	Viscosidad final (cP)	Temperatura de pasta (°C)
H1	283.45±18.88 ^{bcd}	28.80±1.4 ^b	809.75±91.15 ^{bc}	81.75±0.64 ^a
H2	193.50±27.37 ^{cd}	33.76±8.49 ^{ab}	466.05±72.05 ^{cd}	77.54±0.30 ^a
H3	167.75±1.63 ^d	27.87±0.08 ^b	373.45±3.18 ^d	77.91±0.31 ^a
H4	329.65±2.83 ^{bc}	28.41±1.24 ^b	958.05±11.53 ^b	80.10±0.30 ^a
Extrusión	361.30±40.02 ^b	30.77±1.74 ^{ab}	757.65±101.47 ^{bc}	75.35±0.01 ^a
Tradicional	343.85±56.36 ^c	42.75±1.61 ^a	754.70±167.30 ^{bc}	81.29±0.25 ^a
Crudo	3116.50±74.25 ^a	39.30±0.83 ^{ab}	4821±79.20 ^a	81.42±1.86 ^a

H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones ±DS n=2. Para cada tratamiento, letras similares en una misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey.

La viscosidad máxima es el comportamiento de la viscosidad durante la cocción (de 50 °C a 90 °C), que refleja la capacidad del almidón para absorber agua e hincharse (Lopes y col., 2012). Para calentamiento óhmico se obtuvieron valores entre 168 y 330 cP en este parámetro (Cuadro 8), que comparados con la cocción por extrusión y tradicional, los tratamientos H1 y H4 (100 °C/10 min y 110 °C/15 min respectivamente) no mostraron diferencias estadísticas significativas, además de ser valores comparables con los de otros estudios donde se analizaron harinas extrudidas (Lopes y col., 2012; Nkundabombi y col., 2015; Natabirwa y col., 2018).

En este estudio se observa que al aplicar el tratamiento térmico existe una reducción de la viscosidad máxima. La disminución en contraste con la harina no procesadas pueden atribuirse a la desnaturalización de la proteína, la ruptura y pregelatinización

del almidón (en el caso de la extrusión) así como a las interacciones almidón-proteína que dan como resultado estructuras con baja capacidad de interacción con el agua, en comparación al producto crudo (Hernández-Nava y col., 2011, Nkundabombi y col., 2015; Natabirwa y col., 2018)

Este parámetro es de importancia cuando la harina está destinada a la preparación de diversos alimentos, como sopas, pasteles, salsas, botanas, etc., que requieren ciertas propiedades, tales como la viscosidad máxima, que durante el ciclo de calentamiento nos indica qué tan alta o baja podría ser la viscosidad de la muestra durante su cocción, que a su vez, dependerá de la estructura de los gránulos de almidón, su proporción de amilosa y amilopectina, y las combinaciones probables que se podrían hacer con otros ingredientes (Marquezi y col., 2016).

La viscosidad mínima representa la viscosidad más baja lograda durante el calentamiento a 95 ° C. Esta mide la viscosidad cuando los gránulos de almidón hinchados se rompen tras el cizallamiento y/o calentamiento de una muestra (Shafie y col., 2016). En calentamiento óhmico estas se encontraron entre 27 y 33 cP (Cuadro 8), de las cuales, solo el tratamiento H2 (100 °C/15 min) no mostró diferencias estadísticas con respecto a las muestras extrudidas y las cocidas de forma tradicional (Cuadro 8). Sin embargo, estos valores son menores a los reportados en otros estudios (Wani y col., 2013a; Marquezi y col., 2016; Natabirwa y col., 2018). Tener una menor viscosidad mínima refleja diferencias en la susceptibilidad a la descomposición del almidón ante el procesamiento térmico. Las características de la viscosidad mínima pueden estar asociadas con la tasa de exudación de amilosa, hinchazón de gránulos y formación de complejos de amilosa-lípidos (Natabirwa y col., 2018).

La viscosidad final indica la capacidad del material para formar una pasta viscosa durante el enfriamiento (de 90 ° C a 50 ° C). Las viscosidades de las harinas de frijol por calentamiento óhmico aumentaron dando como resultado final un rango entre 373 a 958 cP (Cuadro 8), valores que se encuentran de acuerdo con lo publicado en la literatura para harinas de frijol cocidas (Lopes y col., 2012; Wani y col., 2013a;

Nkundabombi y col., 2015; Ai y col., 2016; Natabirwa y col., 2018), donde nuevamente, los tratamientos H1 y H4 (100 °C / 10 min y 110 °C / 15min respectivamente) presentaron los valores más altos, además de no tener diferencias estadísticas significativas con respecto al proceso por extrusión y la cocción tradicional.

Las diferencias en las propiedades de pegado de los frijoles crudos y extruidos fueron consistentes con Wang y Ratnayake (2014), Nkundabombi y col. (2015), Ai y col. (2016) y Natabirwa y col. (2018), quienes explican que los gránulos de almidón pregelatinizados cuando se calientan con agua muestran menos expansión, además de indicar que la alta composición proteica y las interacciones proteína-almidón reducen la viscosidad de los frijoles procesados.

Además, puede deberse a que al llegar a un aumento en el tamaño del granulo de almidón máximo, ocurre una disminución en la conductividad eléctrica, lo que disminuye el movimiento de las partículas. Esto provoca que aumente la resistencia, que ocasiona cambios en la estructura del almidón, lo cual se ve reflejado en la disminución de viscosidad y una mayor solubilidad en agua (De Hallux y col., 2005). En el calentamiento óhmico la mezcla de la harina con el agua se calienta de manera simultánea, generando internamente el calor por la potencia eléctrica aplicada (Gaytán-Martínez y col., 2012), que al llegar a un aumento en el tamaño del granulo de almidón máximo ocurre una disminución en la conductividad eléctrica, lo que disminuye el movimiento de las partículas, lo que ocasiona cambios estructurales en el almidón, dando como resultado una disminución en la viscosidad y una menor tendencia a la retrogradación debida al voltaje, pero con una mayor estabilidad de cocción en comparación con las muestras no tratadas, probablemente relacionada con mayores cantidades de lixiviación de amilosa, ya que la retrogradación es la reagrupación de las cadenas de almidón desordenadas al enfriarse y almacenarse (An y King, 2007; Gaytán-Martínez y col., 2012) .

A pesar de ello, las bajas viscosidades de las muestras sugieren que pueden incorporarse a las formulaciones de alimentos en un porcentaje relativamente alto, sin aumentar sustancialmente la viscosidad (Ai y col., 2016).

La temperatura de pasta revela la temperatura mínima requerida para la cocción de la harina, así como la temperatura a la cual la viscosidad comienza a aumentar durante el proceso de calentamiento (Lopes y col., 2012).

Las temperaturas de pasta varían entre 77 y 81 °C para el calentamiento óhmico (Cuadro 8), las cuales no muestran diferencias contra los tratamientos convencionales. Estas temperaturas fueron superiores a las encontradas en otros estudios en los que se reporta un rango entre los 36 y 54 °C (Lopes y col., 2012; Nkundabombi y col., 2015), no obstante, coinciden con lo informado por wani y col. (2013a), Wang y Ratnayake (2014), Marquezi y col. (2016) y Natabirwa y col. (2018), donde el rango va desde los 71 °C hasta los 89 °C.

An y King (2007) en un estudio hecho con harinas de arroz, llegaron a la conclusión de que las condiciones de calentamiento óhmico podrían alterar las propiedades térmicas de estas, debido a la interacción de otros componentes con el almidón, como proteínas, fibras y lípidos, provocando una mayor resistencia a la gelatinización, resultando en un aumento de la temperatura de pasta. (Wani y col., 2013a; Marquezi y col., 2016). Afirmaron además que una velocidad de calentamiento más rápida parecía gelatinizar menos las muestras debido al menor tiempo de cocción, lo que resulta en más energía necesaria para la gelatinización (An y King, 2007); sin embargo, esto tendría que comprobarse para el frijol mediante otros estudios.

5.8 Electroforesis de proteínas

En el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) las globulinas representan el principal componente proteico (65%), seguidas por las albúminas, glutelinas y prolaminas (15, 10 y 2%, respectivamente) (Carrasco-Castilla y col., 2012).

La faseolina, una globulina 7S, constituye hasta el 53% de la proteína total (Mojica y de Mejía, 2015). Es una proteína trimérica de 160 kDa que contiene tres subunidades polipeptídicas, α , β y γ , con pesos moleculares entre 43 y 53 kDa (Carrasco-Castilla y col., 2012).

Los patrones electroforéticos de los aislados de proteínas preparados a partir de la harina de frijol en los diferentes tratamientos se muestran en la Figura 10, donde 8 bandas se separaron por su masa molecular en geles de poliacrilamida.

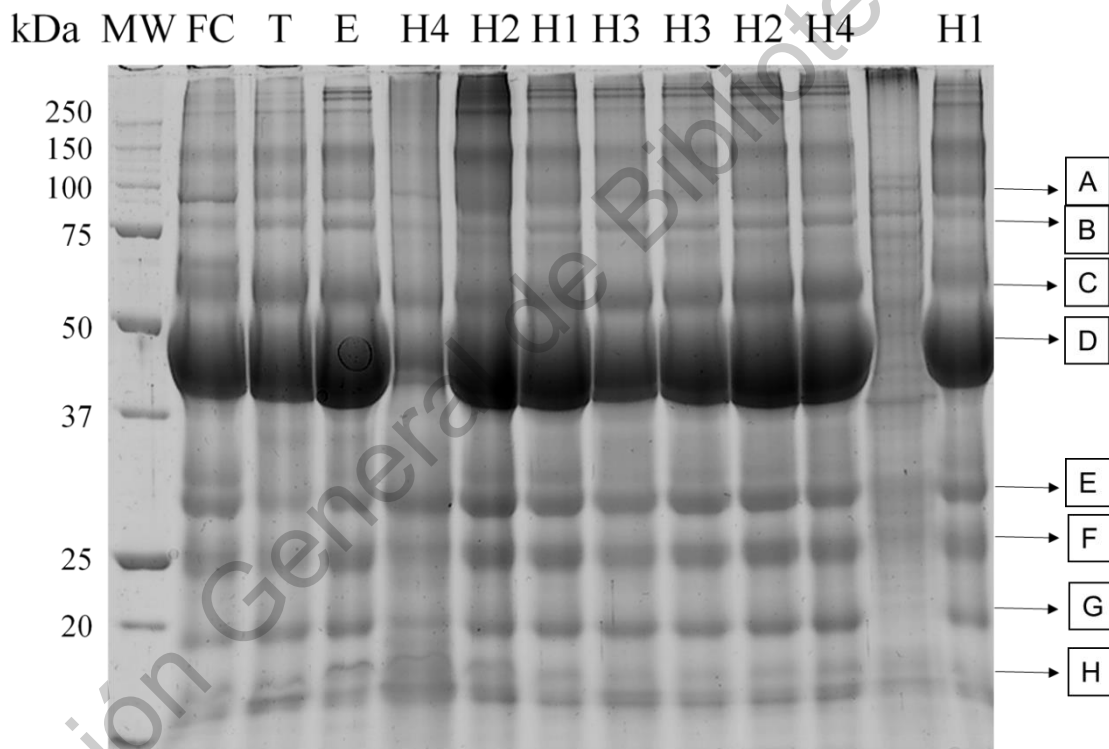


Figura 10. Electroforésis de las harinas de frijol procesadas por diferentes tratamientos, cada una con su repetición. MW: marcador de peso molecular, FC: frijol curdo, T: cocción tradicional, E: extrusión, H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Las letras mayúsculas indican las bandas de proteínas en geles referenciadas de la literatura (Mojica y de Mejía, 2015), A: linoleato 9S lipoxigenasa B: legumina, C: faseolina, D: faseolina, E: lectina F: fitohemaglutinina G: inhibidor de tripsina H: inhibidor de α -amilasa.

En el gel se pudieron identificar linoleato 9S lipoxigenasa, legumina, faseolina, lectinas, fitohemaglutinina, inhibidor de tripsina e inhibidor de α -amilasa.

Estos resultados coinciden con lo publicado por otros autores (Carrasco-Castilla y col., 2012; Mojica y de Mejía, 2015) donde se realiza la identificación proteica de esta leguminosa en diferentes variedades (incluida el frijol negro). Este patrón nos puede dar indicios sobre la concentración de proteínas y antinutrientes, para poder ser considerada como una buena opción, tanto para productores como consumidores.

El perfil de proteínas mostró un patrón similar entre los tres tratamientos (Cocción tradicional, extrusión y calentamiento óhmico); igualmente, al comparar los perfiles con el del frijol crudo (Figura 10, carril 2), las unidades proteicas de los aislados no presentan cambios importantes en los perfiles de electroforesis de proteínas (Figura 10), lo que indica que el tratamiento térmico no alteró la estructura primaria de las proteínas, y que, además, el procesamiento por calentamiento óhmico sigue siendo una alternativa a los procesamientos convencionales, a excepción de la harina H4 (110 °C/15 min), que en una de las repeticiones no se logró identificar el perfil proteico, además de ser la que menor cantidad de proteínas soluble presento (Figura 11), esto puede deberse a que se haya producido una agregación de las proteínas o fracciones proteicas, inducida por calor (ya que fue el tratamiento más severo), que las hace menos susceptibles a la descomposición proteolítica (Carbonaro y col., 2000).

5.9 Cuantificación de proteínas solubles

En la Figura 11 se observa que el contenido de proteína de las harinas procesadas por calentamiento óhmico se encuentran en un rango entre los 29.9 y 34.7 g/100 g de muestra. Aunque estos valores sean menores al del producto crudo, no presentan una diferencia estadística importante con respecto a este ($p \geq 0.05$).

Generalmente, se esperaría una disminución en la solubilidad de las proteínas por efecto del procesamiento térmico, como consecuencia de la desnaturalización de proteínas y la agregación posterior (Habiba, 2002), sin embargo, no se encontró una reducción considerable en ninguno de los casos; además, las concentraciones obtenidas tanto en óhmico como para los otros tratamientos, es mayor a la reportada en otros estudios para otras variedades de frijol (Taylor y col., 2008; Mojica y de Mejía, 2015).

Se ha reportado que existe una relación entre la solubilidad de la fracción proteica con la biodisponibilidad de estas. Uno de los estudios realizados por Carbonaro y col. (1997) reveló una relativa alta digestibilidad de la arginina y el ácido glutámico de estudios *in vivo*, que podría explicarse por la alta recuperación de estos aminoácidos en la fracción soluble de la harina de leguminosas cocidas. Por lo tanto, esto nos sugiere que la harina de frijol obtenida por óhmico, al tener una alta solubilidad de proteínas, estas también podrían ser altamente biodisponibles.

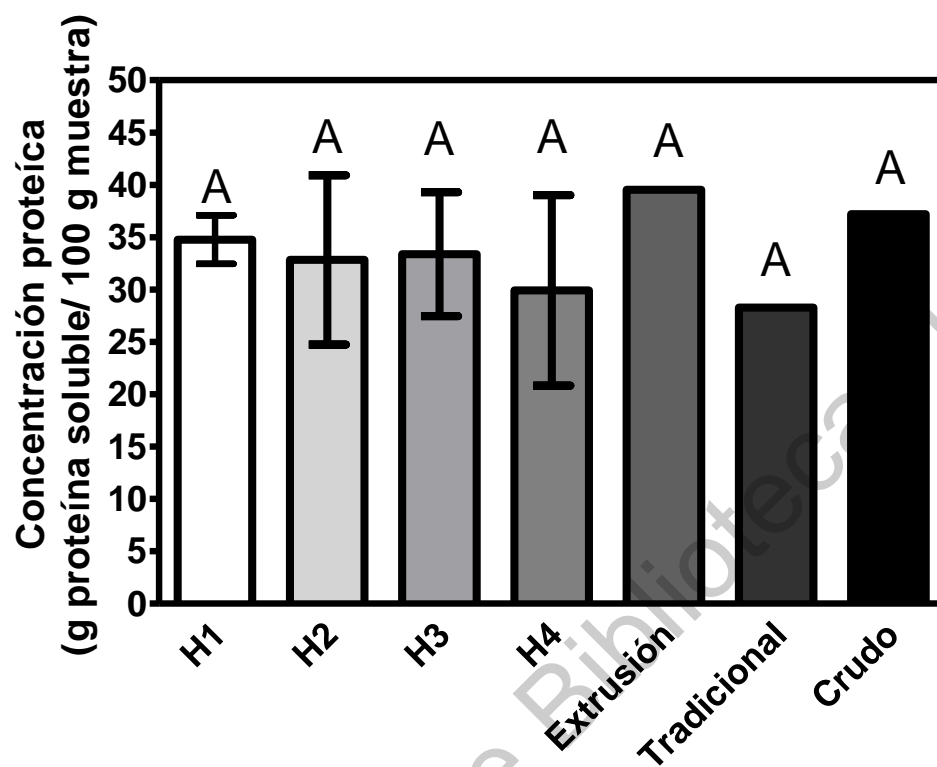


Figura 11. Concentración de proteínas de cada muestra de harina. H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones \pm DS n=2. Para cada tratamiento, letras similares no presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) por la prueba de Tukey.

Sumado a lo anterior, la concentración proteica es igualmente importante debido a que, los péptidos, que son secuencias de aminoácidos de cadena corta que pertenecen a estas proteínas, poseen funciones fisiológicas potenciales más allá de su aporte nutricional y, actualmente, hay diversas investigaciones sobre los péptidos provenientes de esta leguminosa.(Mojica y de Mejía, 2015), donde la desnaturalización térmica durante la cocción, además de inactivar completamente las proteínas antinutrientes, puede contribuir a agregar valor nutricional a la proteína

digerida debido a su alto contenido de aminoácidos azufrados (Marsolais y col., 2010).

5.10 Cuantificación de compuestos antinutricios

5.10.1 Cuantificación de lectinas

Las lectinas son glucoproteínas ampliamente distribuidas en las legumbres que se caracterizan por su capacidad de unirse selectivamente a los carbohidratos. El nombre "hemaglutininas" se utiliza cuando se desconoce la especificidad del azúcar (Gemedé y Ratta, 2014).

La aglutinación de los eritrocitos está dada por la formación de un entrecruzamiento entre las lectinas y la superficie de las células. Al diluir de manera seriada las lectinas y agregar una cantidad constante de eritrocitos puede estimarse la cantidad de lectinas (Hirabayashi, 2014). En el Cuadro 9 se muestra el título de hemaglutinación de la harina de frijol crudo en comparación con las harinas sometidas a los diferentes procesamientos térmicos.

Cuadro 9. Concentración de hemaglutinación/mg de proteína soluble

Muestra	Título de hemaglutinación / mg de proteína
H1	ND
H2	ND
H3	ND
H4	ND
Extrusión	ND
Tradicional	ND
Crudo	688.17 ± 0.00

H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min, ND: No detectado. Los resultados se presentan como la media de las determinaciones ±DS n=2

Puede observarse que la harina de frijol crudo presentó una alta concentración de esta proteína, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura (Mojica y de Mejía, 2015), y que, comparando con las muestras sometidas a tratamiento térmico (tanto las convencionales, como el calentamiento óhmico), en éstas no fue detectable. Estos resultados concuerdan con lo publicado por otros autores (Batista y col., 2010) donde reportan que después del proceso térmico no se observa hemaglutinación.

Estas propiedades antinutricionales son de interés debido a que algunas lectinas deterioran la integridad del epitelio intestinal y, por lo tanto, también la absorción y utilización de nutrientes (De Mejía y col., 2005), por lo que, estos resultados nos permiten comprobar que la alternativa del calentamiento óhmico asegura la inactivación de estos compuestos antinutricios.

5.11 Cuantificación de inhibidores de tripsina

La calidad nutricional de los granos de frijol está limitada por la presencia de factores antinutricionales que dificultan la digestión de nutrientes o su utilización. La reducción

o inactivación de estos factores se realiza mediante el procesamiento térmico (Van der Poel y col, 1990).

Los inhibidores de tripsina pueden inhibir la actividad proteolítica de la enzima digestible tripsina y conducir a una disponibilidad reducida de aminoácidos y, por lo tanto, a una absorción de nutrientes reducida (Akande y col., 2010).

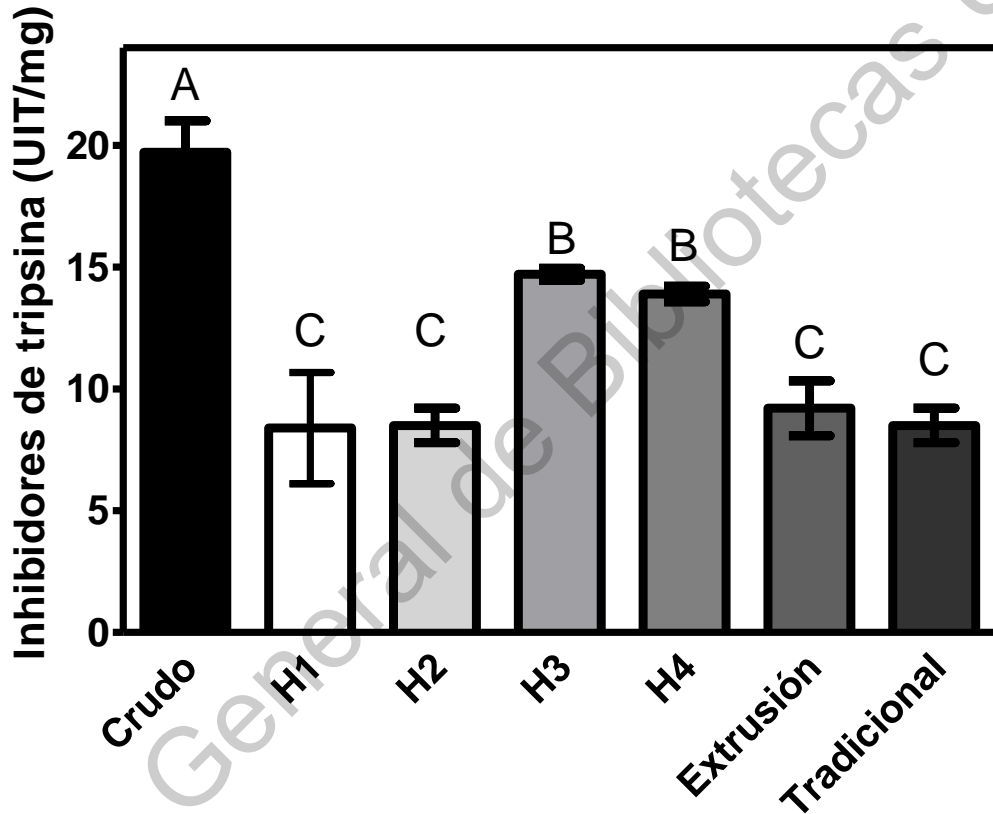


Figura 12. Inhibición de tripsina para cada muestra de harina. H1: 100 °C/10 min, H2: 100 °C/15 min, H3: 110 °C/10 min, H4: 110 °C/15 min. Cada valor representa la media de dos repeticiones \pm DS. Valores con la misma letra no son diferentes entre sí (Tukey $\alpha=0.05$)

En la Figura 12 se muestra el contenido de inhibidores de tripsina para cada una de las harinas analizadas, obteniendo una concentración de 19.72 ± 1.29 UIT/mg para el producto crudo, donde el proceso de calentamiento óhmico mostró una reducción

significativa entre 25.42 y 57.44% con respecto a la harina sin procesar. Además, al comparar el proceso óhmico con extrusión y cocción tradicional, las harinas H1 y H2, no muestran diferencias significativas (con 53.31% y 56.89% de reducción para extrusión y tradicional respectivamente). Para el caso de H3 y H4, está reportado que por naturaleza de la matriz, alcanzando una temperatura de 110 °C, puede darse la unión de iones con las proteínas o que se dé lugar a enlaces cruzados durante la desnaturalización, por efecto de la temperatura, que pueden alterar significativamente la estabilidad térmica de las proteínas, teniendo como consecuencia una mayor resistencia al calor (Donovan y Beardslee, 1975; Moses, y Hinz, 1983), lo que pudo resultar en una menor reducción de los inhibidores.

Esto demuestra que a pesar de la alta estabilidad térmica de los inhibidores de tripsina (Batista y col., 2010) la combinación de calor y humedad del proceso puede reducir considerablemente su actividad inhibidora en las harinas de frijol. Además, se encontró que el tiempo no tiene un impacto en la inactivación de estas proteínas, ya que para ambas temperaturas, el cambio en el tiempo de procesamiento (10 y 15 min) resulta en una concentración similar de inhibidores de tripsina.

Los valores obtenidos coinciden con lo reportado por otros estudios, los cuales indican que existe una reducción promedio del 56.6% de los inhibidores de tripsina en frijol negro procesados por métodos convencionales (De Mejía y col., 2005; Morales y col., 2007, Sánchez-Quezada, 2018).

Se ha informado que ciertos niveles de inhibidores de tripsina tienen efectos antimutagénicos y anticancerígenos, por lo que las concentraciones restantes de este compuesto podrían contribuir a una menor incidencia de cáncer (De Mejía y col., 2005), sin embargo, tendrían que hacerse estudios para evaluar este efecto.

6 CONCLUSIONES

El proceso por calentamiento óhmico para frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) no presenta diferencias significativas entre el proceso de extrusión y la cocción tradicional en cuanto a las propiedades tecno-funcionales de forma general.

Dentro del calentamiento óhmico, las harinas procesadas a 110°C (10 y 15 min) mostraron los valores más altos en capacidad espumeante, capacidad emulsificante y viscosidad, con respecto a los métodos convencionales.

Por otra parte, el calentamiento óhmico disminuyó los compuestos antinutricios, donde las lectinas no fueron detectadas en ninguno de los tratamientos, hubo una reducción de los inhibidores de tripsinas y no se presentaron cambios en el perfil de solubilidad de las proteínas. Además, no se observaron diferencias en el patrón electroforético de proteínas de las harinas de frijol.

Estos resultados sugieren que el procesamiento del frijol por calentamiento óhmico puede ser una alternativa a la extrusión y cocción tradicional para la obtención de harinas de frijol, pero presentando ventajas como : una mayor eficiencia energética (90%), reducción en el tiempo de procesamiento (10-15 min vs 2 h), sin lixiviación de las propiedades nutricionales del frijol, debido a que no se pierde en el caldo de cocción y con características tecno-funcionales similares a las obtenidas por los tratamientos convencionales.

7 BIBLIOGRAFÍA

Abuajah, C. I., Ogbonna, A. C., & Osuji, C. M. (2014). Functional components and medicinal properties of food: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2522–2529.

Adebowale, Y. A., & Adebowale, K. O. (2007). Evaluation of the gelation characteristics of mucuna bean flour and protein isolate. *Electronic journal of environmental, agricultural and food chemistry*, 6(8), 2243-2262.

Ai, Y., Cichy, K. A., Harte, J. B., Kelly, J. D., & Ng, P. K. W. (2016). Effects of extrusion cooking on the chemical composition and functional properties of dry common bean powders. *Food Chemistry*, 211, 538–545.

Ai Y, Jin Y, Kelly JD, Ng PKW. (2017). Composition, functional properties, starch digestibility, and cookie-baking performance of dry bean powders from 25 Michigan-grown varieties. *Cereal Chem* 2017, 94:400-408.

Akande, K. E., Doma, U. D., Agu, H. O., & Adamu, H. M. (2010). Major antinutrients found in plant protein sources: their effect on nutrition. *Pakistan Journal of Nutrition*, 9(8), 827-832.

Akinlosotu A, Akinyele IO. (1991). The effect of germination on the oligosaccharide and nutrient content of cowpeas (*Vigna unguiculata*). *Food Chem* 39: 157-165.

Alonso, R., Rubio, L. A., Muzquiz, M., & Marzo, F. (2001). The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals. *Animal Feed Science and Technology*, 94, 1–13.

Alves, J. S., Rodrigues, A. S., Moro, K. I. B., Boeira, C. P., Londero, P. M. G., & Rosa, C. S. (2019). Chemical characterization, bioactive compounds, and functional technological properties of flour from two cultivars of landrace common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *International Food Research Journal*, 26(2).

Arai, S. (1996). Studies on functional foods in Japan State of the art. *Biosci. Biotech. Biochem.* 60: 9-15.

Arribas, C., Cabellos, B., Sánchez, C., Cuadrado, C., Guillamón, E., & Pedrosa, M. M. (2017). The impact of extrusion on the nutritional composition, dietary fiber and in vitro digestibility of gluten-free snacks based on rice, pea and carob flour blends. *Food & function*, 8(10), 3654-3663.

Balasundram N, Sundram K, Samman S (2006). Phenolic compounds in plants and agriindustrial by-products: antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chem*;99:191–203.

Barampama, Z., & Simard, R. (1993). Nutrient composition, protein quality and antinutritional factors of some varieties of dry beans (*Phaseolus vulgaris*) grown in Burundi. *Food Chemistry*, 47 (2): 159-167.

Batista, K. A., Prudêncio, S. H., & Fernandes, K. F. (2010). Changes in the Functional Properties and Antinutritional Factors of Extruded Hard-to-Cook Common Beans (*Phaseolus vulgaris*, L.). *Journal of Food Science*, 75(3), C286–C290. doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01557.x

Bello-Perez, L. A., & Paredes-López, O. (2009). Starches of some food crops, changes during processing and their nutraceutical potential. *Food Engineering Reviews*, 1(1), 50.

Beninger, C. W.; Hosfield, G. L. (2003). Antioxidant activity of extracts, condensed tannin fractions, and pure flavonoids from *Phaseolus Vulgaris* L. seed coat color genotypes. *J. Agric. Food Chem.*, 51, 7879-7883

Bishnoi, S., Khetarpaul, N., (1993). Variability in physico-chemical properties and nutrient composition of different pea cultivars. *Food Chem.* 47, 371–373.

Bressani R (1993) Grain quality of common beans. *Food Rev Int* 9: 237-297

Bressani, R. (2002). Factors Influencing Nutritive Value in Food Grain Legumes: Mucuna Compared to Other Grain Legumes. Capítulo 8. En: *Food and Feed from Mucuna: Current Uses and the Way Forward*. Proceedings of an International Workshop. Honduras.

Brummer, Y., Kaviani, M. & Tosh, S.M. (2015). Structural and functional characteristics of dietary fibre in beans, lentils, peas and chickpeas. *Food Research International*, 67, 117- 125

Buckle KA, Sambudi H (1990) Effect of soaking and boiling treatments on the quality of winged bean seeds. *J Sci Food Agric* 53: 379-388.

Camargo, K.M., Alves, S.C., Martins, A.A.O., & Vessoni, T.Ch.P. (2010). Ohmic heating a review. *Trends in Food Science Technology*, 21, 436–441.

Campos-Vega, R., Reynoso-Camacho, R., Pedraza-Aboytes, G., Acosta-Gallegos, J. A., Guzman-Maldonado, S. H., Paredes-Lopez, O. (2009). Chemical composition and in vitro polysaccharide fermentation of different beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Science*, 74, T59-T65.

Campos-Vega, R., Oomah, D., Loarca-Piña, G., & Vergara-Castañeda, H. A. (2013). Common beans and their non-digestible fraction: Cancer inhibitory activity-An overview. *Foods*, 2, 374-392.

Carbonara, M., Grant, G., Aguzzi, A., Pusztai, A. (2001). Investigation of the mechanisms affecting Cu and Fe bioavailability from legumes. *Biol Trace Elem Res*, 84, 181-196.

Carbonaro, M., Vecchini, P., & Carnovale, E. (1993). Protein solubility of raw and cooked beans (*Phaseolus vulgaris*): Role of the basic residues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41(8), 1169–1175.

Carbonaro, M., Cappelloni, M., Nicoli, S., Lucarini, M., & Carnovale, E. (1997). Solubility–Digestibility Relationship of Legume Proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(9), 3387–3394.

Carbonaro, M., Grant, G., Cappelloni, M., & Pusztai, A. (2000). Perspectives into Factors Limiting in Vivo Digestion of Legume Proteins: Antinutritional Compounds or Storage Proteins? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(3), 742–749.

Carbonell-Capella, J. M., Barba, F. J., Esteve, M. J., & Frigola, A. (2013). Quality parameters, bioactive compounds and their correlation with antioxidant capacity of commercial fruit-based baby foods. *Food Science and Technology International*, 20, 479-487.

Carbonell-Capella, J. M., Buniowska, M., Barba, F. J., Esteve, M. J., & Frigola, A. (2014). Analytical methods for determining bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13, 155171.

Cardador-Martínez, A.; Castaño-Tostado, E.; Loarca-Piña, G. (2002). Antimutagenic activity of natural phenolic compounds in the common bean (*Phaseolus Vulgaris*) against aflatoxin B1. *Food Addit. Contam*, 19, 62-69. (a)

Cardador-Martínez, A.; Loarca-Piña, G.; Oomah, B. D. (2002). Antioxidant activity in common beans (*Phaseolus Vulgaris* L.). *J. Agric. Food Chem*, 50, 6975-6980. (b)

Carrasco-Castilla, J., Hernández-Álvarez, A. J., Jiménez-Martínez, C., Jacinto-Hernández, C., Alaiz, M., Girón-Calle, J. & Dávila-Ortiz, G. (2012). Antioxidant and metal chelating activities of peptide fractions from phaseolin and bean protein hydrolysates. *Food chemistry*, 135(3), 1789-1795.

Chen, Y.; McGee, R.; Vandemark, G.; Brick, M.; Thompson, H. **(2016)**. Dietary fiber analysis of four pulses using AOAC 2011.25: implications for human health. *Nutrients*, 8:829.

Chico-Peralta, A. (2014). Desarrollo de un sustituto de leche a partir de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis de maestría en ciencia y tecnología de alimentos. Universidad Autónoma de Querétaro. México.

Childs, N. M. (1997). Functional foods and the food industry: consumer, economic and product development issues. *Journal of Nutraceuticals, Functional and Medical Foods*, 1(2), 25–43.

Clemens, R., & Dubost, J. (2008). Catering to gluten-sensitive consumers. *Food Technology*, 62(12), 21.

Correia, R. T., Borges, K. C., Medeiros, M. F., & Genovese, M. I. (2012). Bioactive compounds and phenolic-linked functionality of powdered tropical fruit residues. *Food Science and Technology International*, 18(6), 539547.

Costa, N. M. B., Rosa, C. O. B. (2008). Alimentos Funcionais: benefícios para a saúde. Viçosa, MG, Brazil: Metha.

Dalbhat, C. G., Mahato, D. K., & Mishra, H. N. (2019). Effect of extrusion processing on physicochemical, functional and nutritional characteristics of rice and rice-based products: A review. *Trends in Food Science & Technology*.

De Hallux, D., Piette, G., Buteau, M.L., & Dostie, M. (2005). Ohmic cooking of processed meats: Energy evaluation and food safety considerations. *Canadian Biosystems Engineering*, 47, 3.41–3.47

De Mejía, E.; Guzman-Maldonado, S. H.; Acosta-Gallegos, J. A.; Reynoso-Camacho, R.; Ramirez-Rodriguez, E.; Pons-Hernandez, J. L.; Gonzalez-Chavira, M. M.; Castellanos, J. Z.; Nelly, J. D. (2003). Effect of cultivar and growing location on the trypsin inhibitors, tannins and lectins of common beans (*Phaseolus Vulgaris* L.) grown in semiarid highlands of Mexico. *J. Agric. Food Chem*, 51, 5962-5966.

De Mejía, E. G., Valadez-Vega, M. D. C., Reynoso-Camacho, R., & Loarca-Pina, G. (2005). Tannins, Trypsin Inhibitors and Lectin Cytotoxicity in Tepary (*Phaseolus acutifolius*) and Common (*Phaseolus vulgaris*) Beans. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60(3), 137–145.

Deshpande, SS, Cheryan, M. (1983) Changes in phytic acid, tannins, and trypsin inhibitory activity on soaking of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *Nutr Rep Int* 27: 371-377.

Donovan, J. W., & Beardslee, R. A. (1975). Heat stabilization produced by protein-protein association. A differential scanning calorimetric study of the heat denaturation of the trypsin-soybean trypsin inhibitor and trypsin-ovomuroid complexes. *Journal of Biological Chemistry*, 250(6), 1966-1971.

Du, S. K., Jiang, H., Yu, X., & Jane, J. L. (2014). Physicochemical and functional properties of whole legume flour. *LWT-Food Science and Technology*, 55(1), 308-313.

Duthie, G. G.; Duthie, S. J.; Kyle, J. A. M. (2000). Plant polyphenols in cancer and heart disease: Implications as nutritional antioxidants. *Nutr. Res. Rev*, 13, 79-106.

Escamilla H., B. E., (2013). Producción de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) orgánico y calidad de semilla. UAQ.

Feregrino-Pérez, A. A., Berumen, L. C., Garcia-Alcocer, G., Guevara-Gonzalez, R. G., Ramos-Gomez, M., Reynoso-Camacho, R. (2008). Composition and chemopreventive effect of polysaccharides from common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) on Azoxymethane-induced colon cancer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 8737-8744.

Fernandes, A. C., Nishida, W., Proença, R. P. C. (2010). Influence of soaking on the nutritional quality of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) cooked with or without the soaking water: a review. *Int J Food Sci Tech*, 45, 2209-2218.

Ferreira, C. D., Ziegler, V., Lindemann, I. da S., Hoffmann, J. F., Vanier, N. L., & Oliveira, M. de. (2018). Quality of black beans as a function of long-term storage and moldy development: Chemical and functional properties of flour and isolated protein. *Food Chemistry*, 246, 473–480.

Figuroa, G. J. J., Juarez, I. C. A., Herrera, H. M. G., Guzmán, M. S. H., Sánchez, T. B. I. (2011). Manual elaboración de productos agroindustriales de frijol. Publicación Especial No. 21. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC-INIFAP, 35 p.

FIRA (2001). “El frijol en México, competitividad y oportunidades de desarrollo”, Boletín Informativo, Núm. 316, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura.

FIRA (2008). “Reporte Trimestral del Comportamiento del Frijol. Productos TLCAN”, Boletín Informativo, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, México.

FIRA (2016). “Panorama agroalimentario para frijol 2016”, Boletín Informativo, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, México.

Food Marketing Institute & Prevention Magazine (2001) Shopping for Health, 2001: Reaching Out to the Whole Health Consumer. Food Marketing Institute, Washington, DC.

García Urigüen, P. (2012). La alimentación de los mexicanos. Cambios sociales y económicos, y su impacto en los hábitos alimenticios (1st ed). México: Cámara Nacional de Industria de la Transformación.

García-Mier, L. (2009). Contenido total de taninos condensados en las variedades Pinto Zapata, Azufrado Higuera, Negro 8025 y Bayo Madero de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cocidas por calentamiento óhmico. Maestro en tecnología avanzada. Instituto Politécnico Nacional.

Gavahian, M., Chu, Y. H., & Farahnaky, A. (2019). Effects of ohmic and microwave cooking on textural softening and physical properties of rice. Journal of food engineering, 243, 114-124.

Gaytán-Martínez, M., Figueroa, J. D. C., Vázquez-Landaverde, P. A., Morales-Sánchez, E., Martínez-Flores, H. E., & Reyes-Vega, M. L. (2012). Caracterización fisicoquímica, funcional y química de harinas nixtamalizadas de maíz obtenidas por calentamiento óhmico y proceso tradicional. CyTA - Journal of Food, 10(3), 182–195.

Gemedede, H. F., & Ratta, N. (2014). Antinutritional factors in plant foods: Potential health benefits and adverse effects. International Journal of Nutrition and Food Sciences, 3(4), 284-289.

Gilbert, L. (2000). The functional food trend: what’s next and what Americans think about eggs. Journal of the American College of Nutrition, 19, 507S–512S.

Gil-Chavez, G. J., Villa, J. A., Ayala-Zavala, F., Heredia, J. B., Sepulveda, D., Yahia, E. M., & Gonzalez-Aguilar, G. A. (2013). Technologies for extraction and production of bioactive compounds to be used as nutraceuticals and food.

Granito, M., Frias, J., Doblado, R., Guerra, M., Champ, M., & Vidal-Valverde, C. (2002). Nutritional improvement of beans (*Phaseolus vulgaris*) by natural fermentation. *European Food Research and Technology*, 214(3), 226-231.

Granito, M., Guerra, M., Torres, A., & Guinand, J. (2004). Efecto del procesamiento sobre las propiedades funcionales de *Vigna Sinensis*. *Interciencia*, 29(9), 521-526.

Gubbels, G.H., Ali-Khan, S.T., (1991). Effect of seed quality on cooking quality and yield of a subsequent crop of field pea. *Can. J. Plant Sci.* 71, 857–859.

Gujral, H.S., Sharma, P., Sharma, R., (2013). Antioxidant properties of sand roasted and steam cooked bengal gram (*Cicer arietinum*). *Food Sci. Biotechnol.* 22, 183–188.

Gulati, P., & Rose, D. J. (2018). Effect of extrusion on folic acid concentration and mineral element dialyzability in Great Northern beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, 269, 118–124.

Guo, M. (2009). INTRODUCTION. *Functional Foods*, 1–8.

Habiba, R. (2002). Changes in anti-nutrients, protein solubility, digestibility, and HCl-extractability of ash and phosphorus in vegetable peas as affected by cooking methods. *Food Chemistry*, 77(2), 187–192.

Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 38–46.

Halden, K., De Alwis A.P., & Fryer, P.J. (1990). Changes in the electrical conductivities of foods during ohmic heating. *International Journal of Food Science and Technology*, 25, 9–25

Ham S-S, Kim S-H, Moon S-Y, Chung MJ, Cui C-B, Han E-K. (2009). Antimutagenic effects of subfractions of Chaga mushroom (*Inonotus obliquus*) extract. *Mutat Res Gen Toxicol*; 672:55–9.

Hangen L, Bennink MR. (2002). Consumption of black beans and navy beans (*Phaseolus vulgaris* L.) reduced azoxymethane-induced colon cancer in rats. *Nutr Cancer* 44(1):60–5.

Harper, J.M., (1989). Food extruders and their applications. In: Mercier, C., Linko, P., Harper, J.M. (Eds.), Extrusion Cooking. American Association of Cereal Chemists, St, Paul, Minnesota.

Hasler, C. M. (2002). Functional Foods: Benefits, Concerns and Challenges—A Position Paper from the American Council on Science and Health. The Journal of Nutrition, 132(12), 3772–3781. doi:10.1093/jn/132.12.3772

Hernández-Nava, R. G., Bello-Pérez, L. A., San Martín-Martínez, E., Hernández-Sánchez, H., & Mora-Escobedo, R. (2011). Effect of extrusion cooking on the functional properties and starch components of lentil/banana blends: Response surface analysis. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 10(3), 409-419.

Jiménez JP, Serrano J, Tabernero M, Arranz S, Díaz-Rubio ME, García-Diz L. (2008). Effects of grape antioxidant dietary fiber in cardiovascular disease risk factors. Nutrition;24:646–53.

Joshi, P. K., & Rao, P. P. (2017). Global pulses scenario: status and outlook. Annals of the New York Academy of Sciences, 1392(1), 6-17.

Kakade, M. L., Rackis, J. J., McGhee, J. E., & Puski, G. (1974). Determination of trypsin inhibitor activity of soy products: a collaborative analysis of an improved procedure. Cereal Chem, 51(3), 376-382.

Katsube, N.; Iwashita, K.; Tsushida, T.; Yamaki, K.; Kobori, M. (2003). Induction of apoptosis in cancer cells by bilberry (*Vaccinium myrtillus*) and the anthocyanins. J. Agric. Food Chem, 51, 68-75

Kim, H.J., Choi, Y.M., Yang, A.P., Yang, T.C.S., Taub, I.A., Giles, J., Zoltai, P. (1996). Microbiological and chemical investigation of ohmic heating of particulate foods using a 5 kW ohmic system. Journal of Food Processing and Preservation, 20, 41–58.

Liu, C., Wang, X., Ma, H., Zhang, Z., Gao, W., & Xiao, L. (2008). Functional properties of protein isolates from soybeans stored under various conditions. Food Chemistry, 111(1), 29–37.

Liu, C., Zhang, Y., Liu, W., Wan, J., Wang, W., Wu, L., & Yin, Z. (2011). Preparation, physicochemical and texture properties of texturized rice produce by Improved Extrusion Cooking Technology. Journal of Cereal Science, 54(3), 473–480.

Lopes, L. C. M., de Aleluia Batista, K., Fernandes, K. F., & de Andrade Cardoso Santiago, R. (2012). Functional, biochemical and pasting properties of extruded bean (*Phaseolus vulgaris*) cotyledons. *International journal of food science & technology*, 47(9), 1859-1865.

López-Varela S, González-Gross M, Marcos A. (2002). Functional foods and the immune system: A review. *Eur J Clin Nutr*;56: S29--33

Lue, S., Hsieh, F., & Huff, H. E. (1991). Effects on Expansion Properties, Starch Gelatinization, and Dietary Fiber Content. *Cereal Chemistry*, 68(3), 227-234.

Marsolais F, Pajak A, Yin F y col (2010) Proteomic analysis of common bean seed with storage protein deficiency reveals up-regulation of sulfur-rich proteins and starch and raffinose metabolic enzymes, and down-regulation of the secretory pathway. *J Proteomics* 73: 1587–1600

Marston, K., Khouryieh, H., & Aramouni, F. (2016). Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT - Food Science and Technology*, 65(2016), 637–644.

McWatters, K. H. (1983). Physical and sensory characteristics of Akara processed from cowpea paste and Nigerian cowpea flour. *Cereal Chemistry*, 60, 333e336.

Mishra, A., Mishra, H. N., & Srinivasa Rao, P. (2012). Preparation of rice analogues using extrusion technology. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(9), 1789–1797

Mojica, L., & de Mejía, E. G. (2015). Characterization and Comparison of Protein and Peptide Profiles and their Biological Activities of Improved Common Bean Cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) from Mexico and Brazil. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(2), 105–112.

Mok, J. W., Chang, D.-J., & Joo, C.-K. (2014). Antiapoptotic Effects of Anthocyanin from the Seed Coat of Black Soybean Against Oxidative Damage of Human Lens Epithelial Cell Induced by H₂O₂. *Current Eye Research*, 39(11), 1090–1098.

Moses, E., & Hinz, H.-J. (1983). Basic pancreatic trypsin inhibitor has unusual thermodynamic stability parameters. *Journal of Molecular Biology*, 170(3), 765–776.

Muñoz, S. (2010) Frijol, rica Fuente de proteínas. *CONABIO. Biodiversitas*, 89, 7–11.

Natabirwa, H., Muyonga, J. H., Nakimbugwe, D., & Lungaho, M. (2018). Physico-chemical properties and extrusion behaviour of selected common bean varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1492-1501.

Nciri N, Cho N, El Mhamdi F, Ben Ismail H, Ben Mansour A, Sassi FH, Ben Aissa-Fennira F. (2015). Toxicity assessment of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) widely consumed by Tunisian population. *J Med Food*, 18:1049-1064.

Nikmaram N, Leong SY, Koubaa M, Zhu Z, Barba FJ, Greiner R, Oey I, Roohinejad S.(2017). Effect of extrusion on the anti-nutritional factors of food products: an overview. *Food Control*, 79:62-73.

Nkundabombi, M. G., Nakimbugwe, D., & Muyonga, J. H. (2015). Effect of processing methods on nutritional, sensory, and physicochemical characteristics of biofortified bean flour. *Food Science & Nutrition*, 4(3), 384–397.

Nnann IA, Phillips RD (1990) Protein and starch digestibility and flatulence potential of germinated cowpeas (*Vigna unguiculata*). *J Food Sci* 55: 151-153.

Paredes-López, O., Carabez-Trejo, A., Palma-Tirado, L., & Reyes-Moreno, C. (1991). Influence of hardening procedure and soaking solution on cooking quality of common beans. *Plant Foods for Human Nutrition*, 41(2), 155–164.

Paredes-López, O., Guevara-Lara, F., & Bello-Pérez, L. A. (2006). Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas. México: Fondo de Cultura Económica (Chapter 3).

Parvathy KS, Negi PS, Srinivas P. (2009). Antioxidant, antimutagenic and antibacterial activities of curcumin- β -diglucoside. *Food Chem*;115:265–71.

Porrini, M., & Riso, P. (2008). Factors influencing the bioavailability of antioxidants in foods: A critical appraisal. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 18, 647-650.

Raes K, Knockaert D, Struijs K, Van Camp J. (2014). Role of processing on bioaccessibility of minerals: influence of localization of minerals and anti-nutritional factors in the plant. *Trends Food Sci Technol*, 37:32-41.

Rafi, M. M.; Vastano, B. C.; Zhu, N.; Ho, C.; Ghai, G.; Rosen, R. T.; Gallo, M. A.; DiPaola, R. S. (2002). Novel polyphenol molecule isolated from licorice root

(*Glycyrrhiza glabra*) induces apoptosis, G2/M cell cycle arrest, and Bcl-2 phosphorylation in tumor cell lines. *J. Agric. Food Chem*, 50, 677-684.

Ramírez-Jiménez, A. K., Reynoso-Camacho, R., Mendoza-Díaz, S., & Loarca-Piña, G. (2014). Functional and technological potential of dehydrated *Phaseolus vulgaris* L. flours. *Food Chemistry*, 161, 254–260.

Ranilla, L. G., Genovese, M. I., Lajolo, F. M. (2009). Effect of different cooking conditions on phenolic compounds and antioxidant capacity of some selected Brazilian bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *J. Agr Food Chem*, 57, 5734-5742

Reynoso-Camacho R., E. González de Mejía, and G. Loarca-Piña. (2003). Purification and acute toxicity of a lectin extracted from tepary bean (*Phaseolus acutifolius*). *Food Chem Toxicol Int J Publ Br Ind Biol Res Assoc* 41:21–27.

Roberfroid, M. (1993). Dietary fiber, inulin, and oligofructose: a review comparing their physiological effects. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 33(2), 103-148.

SAGARPA (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Frijol mexicano. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación. México.

Saha, S., Singh, G., Mahajan, G., Gupta, H. S. (2009). Variability of nutritional and cooking quality in vean (*Phaseolus vulgaris* L) as a function of genotype. *Plant Food Hum Nutr*, 64, 174-180.

Sánchez-Mendoza, N. A., Ruiz-Ruiz, J. C., Dávila-Ortiz, G., & Jiménez-Martínez, C. (2017). Propiedades tecnofuncionales y biológicas de harina, aislado y fracciones proteicas mayoritarias de semillas de *Inga paterno*. *CyTA - Journal of Food*, 15(3), 400-408.

Sánchez-Quezada, V. (2018). Enriquecimiento con aislado proteico y hierro biodisponible de una bebida a base de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) extruido variedad Bayo Madero. Tesis de maestría en ciencia y tecnología de alimentos. Universidad Autónoma de Querétaro. México.

Sastry, S.K., & Fa-Li, L. (1996). Modeling the ohmic heating of foods. *Food Technology*, 50, 246–248.

Satya, S., Kaushik, G., Naik, S.N., (2010). Processing of food legumes: a boon to human nutrition. *Mediterranean J. Nutr. Metab.* 3, 183– 195.

Sefa-Dedeh, S., Stanley, D.W., (1979). Textural implications of the microstructure of legumes. *Food Technol.* 33, 77–83.

Serrano, J., & Goñi, I. (2004). Role of black bean (*Phaseolus vulgaris*) on the nutritional status of Guatemalan population. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 54, 36 –44.

Shafie, B., Cheng, S. C., Lee, H. H., & Yiu, P. H. (2016). Characterization and classification of whole-grain rice based on rapid visco analyzer (RVA) pasting profile. *International Food Research Journal*, 23(5).

Sharma, A., & Sehgal, S. (1992). Effect of processing and cooking on the antinutritional factors of faba bean (*Vicia faba*). *Food Chemistry*, 43(5), 383-385.

Siddiq, M., Ravi, R., Harte, J. B., & Dolan, K. D. (2010). Physical and functional characteristics of selected dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT - Food Science and Technology*, 43(2), 232–237.

Siddiq, M., Kelkar, S., Harte, J. B., Dolan, K. D., & Nyombaire, G. (2013). Functional properties of flour from low-temperature extruded navy and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *LWT - Food Science and Technology*, 50(1), 215-219.

Silva, E.O., Bracarense APFRL. (2016). Phytic acid: from antinutritional to multiple protection factor of organic systems. *J Food Sci*, 81:R1357-R1362

Simpson, R.R., Jiméñez, P.M., Carevic, G.E., & Grancelli, M.R. (2007). Aceleración de la deshidratación osmótica de frambuesas (*Rubus idaeus*) por medio de calentamiento óhmico. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57, 192–195

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). *Extrusion Processes for Foods. Introduction to Food Engineering*, 743–766.

Singh B, Singh JP, Shevkani K, Singh N, Kaur A. (2017) Bioactive constituents in pulses and their health benefits. *J Food Sci Technol*, 54:858-870.

Skudder, P.J. (1988). Ohmic heating: New alternative for aseptic processing of viscous foods. *Food Engineering*, 60(1), 99–101

Slupski, J. (2010). Effect of cooking and sterilisation on the composition of amino acids in immature seeds of flageolet bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Food Chem*, 121, 1171-1176.

Sumathi, S. and Pattabiraman, T.N. (1976). Natural plant enzyme inhibitors:Part II - Protease inhibitors of seeds. *Ind. J. Biochem. Biophys.*, 13: 52-56.

Taylor, M., Chapman, R., Beyaert, R., Hernández-Sebastià, C., & Marsolais, F. (2008). Seed Storage Protein Deficiency Improves Sulfur Amino Acid Content in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): Redirection of Sulfur from γ -Glutamyl-S-methyl-cysteine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(14), 5647–5654.

Téllez-Téllez, P., Arellano San Vicente, A., Buendía-González, M. O., Velázquez Mendoza, J., & Vázquez Carrillo, G. (2009). Optimización de nixtamalización de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y desarrollo de un nuevo producto alimenticio. *Ingeniería Agrícola Y Biosistemas*, 1(1), 25–31.

Thaoge, M. L., Adams, M. R., Sibara, M. M., Watson, T. G., Taylor, J. R. N., & Goyvaerts, E. M. (2003). Production of improved infant porridges from pearl millet using a lactic acid fermentation step and addition of sorghum malt to reduce viscosity of porridges with high protein, energy and solids (30%) content. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 19(3), 305-310.

Tharanathan, R. N., & Mahadevamma, S. (2003). Grain legumes-a boon to human nutrition. *Trends in Food Science and Technology*, 14, 507-518.

Torruco-Uco J., L. Chel-Guerrero, A. Martínez-Ayala, G. Dávila-Ortíz, and D. Betancur-Ancona. (2009). Angiotensin-I converting enzyme inhibitory and antioxidant activities of protein hydrolysates from *Phaseolus lunatus* and *Phaseolus vulgaris* seeds. *LWT - Food Sci Technol* 42:1597–1604

Trindade MI, Abratt VR, Reid SJ. (2003). Induction of sucrose utilization genes from *Bifidobacterium lactis* by sucrose and raffinose. *Appl Environ Microb* 69(1): 24–32

Van Der Poel, A. F. B. (1990). Effect of processing on antinutritional factors and protein nutritional value of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). A review. *Animal Feed Science and Technology*, 29(3-4), 179–208.a

Van der Poel, T.F.B., Blonk J, van Zuilichem DJ, Van Dort MG (1990) Thermal inactivation of lectins and trypsin inhibitor activity during steam processing of dry beans (*Phaseolus vulgaris*) and effects on protein quality. *J Sci Food Agric* 53: 215-228.b

Vargas-Torres, A., Osorio-Díaz, P., Islas-Hernandez, J. J, Tovar, J., Paredes-Lopez, O., and Bello-Perez, L. A. (2004). Starch digestibility of five cooked black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties. *Journal of food composition and analysis*, 17, 605–612.

Vergara-Castañeda H.A., R.G. Guevara-González, M. Ramos-Gómez, R. Reynoso-Camacho, H. Guzmán-Maldonado, A.A. Feregrino-Pérez, B.D. Oomah. (2010). Non-digestible fraction of cooked bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar Bayo Madero suppresses colonic aberrant crypt foci in azoxymethane-induced rats. *Food Funct* 1:294–300.

Vindiola, O.L., Seib, P.A., Hosney, R.C. (1986). Accelerated development of the hard-to-cook state in beans. *Cereal Foods World* 31, 538–552.

Wang, W.C., & Sastry, S.K. (1993). Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for ohmic heating: Conductivity profile and vacuum infusion studies. *Journal of Food Engineering*, 20, 299–309.

Wang, H., & Ratnayake, W. S. (2014). Physicochemical and thermal properties of *Phaseolus vulgaris* L. var. Great Northern Bean Starch. *Journal of food science*, 79(3), C295-C300.

Wani, I. A., Sogi, D. S., Wani, A. A., & Gill, B. S. (2013). Physico-chemical and functional properties of flours from Indian kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *LWT - Food Science and Technology*, 53(1), 278–284.a

Wani, I.A., Sogi, D.S., Gill, B.S., (2013). Physical and cooking characteristics of black gram (*Phaseolus mungoo* L.) cultivars grown in India. *Int. J. Food Sci. Technol.* 48, 2557–2563.b

Worku A, Sahu O. (2017). Significance of fermentation process on biochemical properties of *Phaseolus vulgaris* (red beans). *Biotechnol Rep*, 16:5-11.

Ye, X., Ruan, R., Chen, P., & Doona, C. (2004). Simulation and verification of ohmic heating in static heater using MRI temperature mapping. *LWT-Food Science and Technology*, 37(1), 49-58.

Yin C, Wong JH, Ng TB. (2015). Isolation of a hemagglutinin with potent antiproliferative activity and a large antifungal defensin from *Phaseolus vulgaris* cv Hokkaido large pinto beans. *J Agric Food Chem*, 63:5439-5448.

Dirección General de Bibliotecas UAQ