

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ÁREA DE CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS Y PESQUERAS
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT



SISTEMA DE BIBLIOTECAS

**EFFECTO DEL ULTRASONIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE
HIDRATACIÓN DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.)**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA:

Q.F.B. LEOPOLDO RAFAEL LÓPEZ LÓPEZ

DIRECTOR:

Dr. JOSÉ ARMANDO ULLOA

CODIRECTOR:

Dr. JOSÉ CARMEN RAMÍREZ RAMÍREZ

TEPIC, NAYARIT; OCTUBRE DE 2015.



CBAP/225/15.

Xalisco, Nayarit; 27 de octubre de 2015.

ING. ALFREDO GONZÁLEZ JÁUREGUI
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.

Con base al oficio de fecha 08 de octubre del presente, enviado por los CC. Dr. José Armando Ulloa, Dr. José Carmen Ramírez Ramírez, M.C. Petra Rosas Ulloa, M.C. Yessica Silva Carrillo y Dr. Armando Quintero ramos, donde se indica que el trabajo de tesis cumple con lo establecido en forma y contenido, y debido a que ha cumplido con los demás requisitos que solicita el Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias; dependiente de la Universidad Autónoma de Nayarit, se autoriza al C. **Leopoldo Rafael López López**, continúe con los trámites necesarios para la presentación del examen de grado de Maestría en Ciencias Biológico Agropecuarias el Área de Ciencias Agrícolas.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Por lo Nuestro a lo Universal"

Dr. J. Diego García Paredes
Coordinador del Posgrado



C.e.p.- Expediente

Amem

El proyecto de investigación fue realizado en el Centro de Tecnología de Alimentos perteneciente a la Secretaría de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN)

Durante el desarrollo de la tesis, se tuvo el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), con número de becario 550780.

DEDICATORIAS

A mis padres

A mis hermanos

A mi novia

A Dios

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por tanto apoyo y comprensión.

A mi novia Adylene Ulloa por su paciencia y su motivación.

A mis amigos por hacerme más ameno la estancia en el laboratorio.

A mis asesores por su exigencia y confianza que siempre me tuvieron.

A la maestra Petty por tanta paciencia y apoyo en el transcurso de la maestría.

Al Dr. Ulloa por su constante asesoramiento en el desarrollo del proyecto, así también gracias por ayudarme a cumplir en tiempo y forma cada una de las metas fijadas.

A mis compañeros de posgrado. Juan, Eddy, Rosario, Ceviche, Minerva y Mayte. Gracias por la retroalimentación de conocimientos y la sana convivencia en el laboratorio.

A mis compañeros de servicio y prácticas: Arturo, Alejandro, Carlos, Antonio, Fabrizio, Graciela, Yesica, Mariel, Dulce, Namibia, Janeth y Lucy. Gracias por ayudarme con la parte más tediosa del proyecto.

A Juan por explicarme el uso de los paquetes estadísticos.

A Rosario mi compañera de generación de la maestría por aguantarme en todas las clases.

CONTENIDO

Índice de tablas	VIII
Índice de figuras.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 General	3
2.2 Particuiare.....	3
3. HIPÓTESIS	3
4. REVISIÓN LITERARIA	4
4.1 Generalidades del frijol.....	4
4.2 Estructura de la semilla.....	4
4.3 Producción de frijol en México	6
4.4 Comercialización y preferencia de frijol en México.....	7
4.5 Competitividad del frijol en México	8
4.6 Productos industrializados del frijol	10
4.7 Propiedades alimentarias del frijol.....	11
4.8 Componentes antinutricionales del frijol.....	12
4.9 Hidratación tradicional de frijol	14
4.10 Modelos matemáticos.....	16
4.11 Aplicación del ultrasonido en alimentos	16
4.11.1 Principios del ultrasonido	16
4.11.2 Clasificación del ultrasonido y usos en alimentos.....	17
4.11.3 Ultrasonido e hidratación de granos	19
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
5.1 Materia prima y su preparación	20
5.2 Caracterización física y química del frijol.....	20
5.3 Contenido de cáscara.....	21
5.4 Tratamientos de remojo con ultrasonido.....	21
5.4.1 Tratamiento de remojo sónico de alta frecuencia (42 kHz).....	22

5.4.2	Tratamiento de remojo sónico de baja frecuencia (20 kHz).....	22
5.5	Modelamiento de las cinéticas de hidratación	23
5.5.1	Modelo de Peleg	24
5.5.2	Primer Orden.....	24
5.5.3	Modelo Sigmoideal.....	25
5.5.4	Modelo de Weibull	25
5.6	Selección del modelo matemático con mejor ajuste	26
5.7	Difusividad efectiva (D_{eff}).....	27
5.8	Análisis estadístico.....	27
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
6.1	Caracterización física y química del frijol	28
6.2	Cinética de absorción de agua	29
6.3	Ajuste de las cinéticas de hidratación a los modelos matemáticos y selección del modelo con mejor ajuste	32
6.4	Efecto del contenido de cáscara en las propiedades de hidratación, ...	39
6.5	Contenido de humedad de equilibrio (H_e)	41
6.6	Efecto del ultrasonido en la difusividad efectiva (D_{eff}) durante el remojo sónico de frijol	43
7.	CONCLUSIONES	44
8.	LITERATURA CITADA.....	45

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades funcionales de algunos factores antinutricionales	14
Tabla 2. Condiciones del experimento para la hidratación de las distintas variedades de frijol.....	23
Tabla 3. Características físicas de semillas de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>).....	28
Tabla 4. Composición química de las semillas de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>).....	29
Tabla 5. Estimadores estadísticos de los modelos matemáticos ajustados a las cinéticas de hidratación de las variedades de frijol Mayocoba, Azufrado, Pinto, Peruano Bola, Flor de Mayo y Negro Jamapa.....	34
Tabla 6. Constantes de los modelos matemáticos ajustados a las cinéticas de hidratación de las variedades de frijol Mayocoba, Azufrado, Pinto, Peruano Bola, Flor de Mayo y Negro Jamapa	38
Tabla 7. Efecto del tratamiento de remojo en las propiedades de hidratación del frijol a 30°C	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología del frijol.....	5
Figura 2. Cinéticas de hidratación por efecto de la energía de ultrasonido para las variedades de frijol (a) Mayocoba, (b) Azufrado, (c) Pinto, (d) Peruano Bola, (e) Flor de Mayo y (f) Negro Jamapa.....	30
Figura 3. Cinéticas de hidratación por efecto de la energía de ultrasonido para las variedades de frijol (a) Mayocoba, (b) Azufrado, (c) Pinto, (d) Peruano Bola, (e) Flor de Mayo y (f) Negro Jamapa.....	36
Figura 4. Efecto de la potencia de ultrasonido de baja frecuencia (20 kHz) en la velocidad de absorción de agua en el remojo de frijol Mayocoba (a), Azufrado (b), Pinto (c), Peruano Bola (d), Flor de mayo (e) y Negro Jamapa (f).	39

1. INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), junto con el maíz, constituye la dieta básica para la mayoría de los mexicanos y se utiliza en la preparación de diversos platillos. De los principales problemas relacionados con el consumo de frijol destaca el tiempo prolongado de preparación (Piergiovanni, 2011). Ante tal situación, un producto como el frijol entero instantáneo representa una alternativa para la rápida preparación y promoción de su consumo. Sin embargo, el proceso de producción de frijol entero instantáneo de alta calidad funcional es relativamente largo (Ulloa *et al.*, 2013).

Por otra parte, el ultrasonido (US) es una tecnología de reciente aplicación en la industria de alimentos que resulta muy provechosa en los procesos que implican fenómenos de transferencia de masa, como es el caso de la hidratación de alimentos (Cárcel *et al.*, 2012).

El empleo de ultrasonido en el procesamiento de alimentos está basado en la ventaja que representa sobre los procedimientos tradicionales, al reducir tiempos de proceso y mejorar atributos de calidad (Robles-Ozuna y Ochoa-Martínez, 2012). Esta tecnología se aplica en las modalidades de alta y baja intensidad, así como de alta y baja frecuencia. De esta manera, variando la longitud de onda, frecuencia e intensidad es que se promueven mejores tiempos y formas de mezclado, al igual que transferencia de energía y masa, para reducir tiempos de extracción e incrementar la producción y elaboración de alimentos.

Por lo anterior, la aplicación de ultrasonido podría mejorar la difusividad del agua y en consecuencia reducir el tiempo de remojo del frijol en el proceso de preparación de frijol entero instantáneo. Este estudio está encaminado a evaluar el efecto de ultrasonido en las propiedades de hidratación de frijol.

2. OBJETIVOS

2.1 General

Evaluar el efecto del ultrasonido en las cinéticas de hidratación de frijol.

2.2 Particulares

- 2.2.1 Caracterizar física y químicamente las semillas de frijol.
- 2.2.2 Determinar la absorción de agua en el frijol por efecto del tratamiento con ultrasonido.
- 2.2.3 Modelar la cinética de absorción de agua del frijol por efecto del tratamiento con ultrasonido.
- 2.2.4 Evaluar la bondad del ajuste del modelado de hidratación de frijol por efecto de tratamiento con ultrasonido.

3. HIPÓTESIS

La aplicación de ultrasonido reduce significativamente el tiempo de hidratación del frijol crudo.

4. REVISIÓN LITERARIA

4.1 Generalidades del frijol

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una valiosa fuente de hidratos de carbono, fibra dietética y proteínas. Esto último es importante, especialmente en los países en desarrollo. Por otra parte, el frijol es una buena fuente de vitaminas (especialmente del grupo B) y minerales como el potasio, zinc, calcio y magnesio (Saha *et al.*, 2009).

Además de nutrientes, el frijol contiene sustancias que durante mucho tiempo fueron consideradas como indeseables por reducir el valor nutritivo de dicho alimento, apreciación que en los últimos tiempos ha cambiado. Ramírez-Cárdenas *et al.* (2008) reportaron que bajas concentraciones de fitatos y compuestos fenólicos pueden ser protectores contra el cáncer y ciertas enfermedades cardiovasculares. Mientras tanto, la fermentación de oligosacáridos puede tener resultados positivos, como la producción de ácidos grasos de cadena corta y la disminución del pH intestinal (Campos-Vega *et al.*, 2009).

4.2 Estructura de la semilla

La estructura anatómica del frijol se muestra en la Figura 1. La semilla está compuesta por cáscara o testa, el hilo, el micrópilo y los cotiledones. La capa externa de la semilla es la cáscara o testa y está compuesta de una cutícula delgada, la cual cubre una capa de células de pared gruesa llamadas células empalizadas (Carmona-García, 2005). El hilo es una cicatriz ovalada y se puede observar en la

parte media de la superficie de la semilla. De igual manera, el micrópilo es una pequeña abertura de la testa junto al hilio (Arias-Restrepo *et al* 2007). En cuanto a los cotiledones, constituyen la parte principal del frijol con respecto a su peso y volumen, y muestran una estructura altamente organizada, siendo su principal función la reserva de nutrientes tales como proteínas y carbohidratos (Camacho-Espinoza *et al.*, 2010; Bello-Pérez y Paredes-López, 2009).

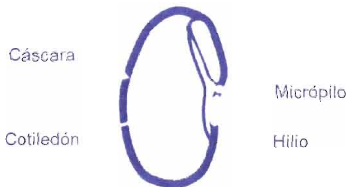


Figura 1 . Morfología del frijol

4.3 Producción de frijol en México

En México el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los cultivos más importantes tanto por la superficie cultivada como por el volumen de producción anual, posicionándose como el segundo cultivo en importancia comercial después del maíz (Barrios-Gómez *et al.*, 2010).

El frijol es considerado como uno de los alimentos más importantes, dado que ocupa el segundo lugar en superficie sembrada, con un promedio de 1.6 millones de hectáreas cosechadas y un valor de la producción de 7 mil millones de pesos (SIAP-SAGARPA, 2010)

El 44 % de la superficie que se siembra de frijol es bajo riego con rendimientos de 1,610 kg ha⁻¹, mientras que 56 % de la superficie es de temporal con promedios de 550 kg ha⁻¹. Este problema empeora en áreas con suelos pobres (Acosta-Gallegos *et al.*, 2000). Más de las tres cuartas partes de la superficie sembrada en temporal se establece en primavera-verano en el Altiplano Mexicano, donde la sequía intermitente es el principal factor limitante del rendimiento (Barrios-Gómez *et al.*, 2010).

La producción de frijol durante el periodo 2003-2012, mostró una tendencia a la disminución, presentándose en el 2011 la producción más baja de los últimos 10 años (SIAP-SAGARPA, 2013). Así, la baja producción interna no es capaz de cubrir la demanda de frijol en México, y el déficit debe ser importado.

En los años sesenta México no importaba frijol, sino todo lo contrario, lo exportaba. En 1966 se vendieron al mercado externo 102 mil toneladas y en 1978, 130 mil. Sin embargo, a partir de la década de los años ochenta, México se convirtió en un importador de este alimento y actualmente es el sexto país comprador en el mercado internacional, siendo Estados Unidos su principal abastecedor (FAO, 2005).

Aunado a lo anterior, los productores en México enfrentan problemas como los altos costos de producción y el deterioro continuo de los precios reales del producto. Entre 1980 y 2005, el índice de precios de insumos para la producción de frijol creció a una tasa promedio anual de 30.44 %, mientras que la del índice de precios de frijol al productor decreció en 2.1 % y los rendimientos apenas crecieron 0.4 % (SIACON-SAGARPA, 2004), con lo que se ha reducido la rentabilidad del cultivo.

4.4 Comercialización y preferencia de frijol en México

Las variedades de frijol negro Jamapa, Peruano, Mayocoba, Flor de Mayo, Pinto y Azufrado, son representativas del consumo a nivel nacional (Rodríguez-Licea *et al.*, 2010). Las distintas variedades de frijol común difieren en tamaño, color y contenido de proteína (Castillo-González *et al.*, 2006). Las variedades de frijol comerciales son principalmente: Garbancillo, Frijol negro, Peruano, Flor de Mayo y Flor de junio (Singh, 2007).

A pesar del desconocimiento que existe por parte de los consumidores, en México existe una importante diferencia en las preferencias por tipo de frijol: 77.2 % de la población prefiere frijol en grano (45.2 % de primera clase, 21.6 % de segunda y 10.4 % extra-clase) y el 22.8 % frijol industrializado. En el primer caso, 47.5 % lo adquiere sin ningún tipo de beneficio y en diferentes cantidades (a granel) y 29.7 % lo compra empacado o beneficiado (limpio, seleccionado, cribado, pulido y empacado) en bolsas de 1 kg. Entre quienes prefieren el industrializado, 17.9 % opta por el enlatado, 2.9 % por el empaque al vacío, 1.5 % por el empaque tetra-Pack y 0.5 % por el deshidratado (Rodríguez-Licéa *et al.*, 2010)

Prácticamente, el valor agregado que se aporta al producto es poco significativo y según datos de Sánchez-Rodríguez *et al.* (2001), se estima que el 26 % de la producción de frijol se destina a la industria beneficiadora/encostaladora. Tal industria se ubica principalmente cerca de los mercados mayoristas de los principales estados del país como son D.F., Estado de México, Jalisco y Nuevo León (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2001).

4.5 Competitividad del frijol en México

Al considerar la definición de Sharples y Milham (1990) y como indicador de competitividad a la participación que ocupa la producción nacional sobre el consumo nacional, es fácil mostrar que los productores de maíz y frijol no han ganado mercados en los últimos años, y se ha permitido que productores extranjeros se apoderen de los nuevos mercados regionales

Las importaciones agroalimentarias aumentaron de 2,755.7 millones de dólares por año en el trienio 1980-1982, a 5,582.1 millones de dólares para los años de 1991-1993, y a 10,870.8 millones de dólares en el periodo 2000-2002 (Calva-Téllez *et al.*, 2006).

Los consumidores no son indiferentes a la diversidad y el precio del frijol en el mercado. La importación de variedades producidas en Estados Unidos (Negro Michigan y Pinto Americano), de mejor calidad y comercializadas a buen precio, que compiten con las nacionales (Negro Nayarit y Pinto Nacional) han logrado posicionarse poco a poco en el mercado, principalmente en el norte del país (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2001).

Las comercializadoras compran el frijol al productor, lo clasifican por tamaños y colores, lo almacenan y lo encostalan. Estas también se encargan tanto de las exportaciones como de las importaciones de frijol. Junto con la infraestructura de transporte que facilita la movilización del producto, dichas empresas han sido pieza fundamental en la consolidación de Estados Unidos como un importante exportador (Boland *et al.*, 1998).

El tamaño de las empresas productoras permite que éstas lleven a cabo el primer beneficio industrial (que consiste en la limpieza y pulido del frijol). Otra ventaja que ofrece el tamaño de las industrias es el contar con una gran organización sectorial que permite importantes economías de escala y ventajas comparativas en costos (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2001).

En su caso, la pérdida de competitividad de la producción de maíz y frijol en México por la importancia económica, social y política de ambos productos, hace indispensable proteger la actividad maicera y frijolera del país, de manera semejante al apoyo que otros países otorgan a sus productores agrícolas a través de los subsidios. Al respecto, destaca el caso de Japón, la Unión Europea y los Estados Unidos, países en donde se otorgan considerables subsidios a productos agrícolas que son considerados estratégicos para sus economías (García-Salazar *et al.*, 2006).

4.6 Productos industrializados del frijol

Las formas en que se comercializa el frijol son diferentes, en promedio 5 % se utiliza como semilla, 90 % se destina al consumo humano, el 5 % restante constituye las mermas que se producen por la transportación del producto. El 20 % del frijol producido en México es para el autoconsumo. La venta de frijol empacado se ha incrementado en 8 %, la venta a granel disminuyó en 15 % y únicamente 7 % se procesa industrialmente (SIAP-SAGARPA, 2003).

La industria de frijol no está muy desarrollada, debido que por cuestiones tradicionales el consumo de dicho alimento se ha realizado tradicionalmente en grano, por lo que no es hasta la década de los noventa que comenzó a tomar fuerza el procesamiento industrial del frijol, lo cual ha obedecido principalmente a los cambios en los hábitos alimenticios principalmente de las zonas urbanas, donde la mujer participa con mayor frecuencia en la economía familiar, lo que acorta los tiempos para la elaboración de los alimentos (SAGARPA, 2008).

En lo general las marcas que se dedican a la producción de frijoles enlatados en México, cumplen con los requerimientos de calidad establecidos en las normas oficiales. Los frijoles, tanto los preparados en casa como los industrializados, proporcionan en promedio 5 % de proteínas, y el contenido de grasa varía de acuerdo con su elaboración. Los frijoles enteros enlatados contienen de 0.5 a 1.5 % de grasa, mientras que en el caso de los refritos esta proporción varía del 3 a 10 % (PROFECO, 2001).

4.7 Propiedades alimentarias del frijol

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es ampliamente producido y consumido en el mundo. La importancia de esta especie radica en su alto contenido en proteínas de alta calidad, constituyendo una fuente importante de estos nutrientes para personas de escasos recursos (De Godínez *et al.*, 1992).

El concepto de calidad proteica, considera dos aspectos importantes de la proteína de la dieta que pueden diferir ampliamente: la composición en aminoácidos indispensables (perfil y proporción) y su digestibilidad. De la proteína del frijol destaca su aceptable digestibilidad (50-80 %), aunque es ligeramente menor a la de los cereales (70-90 %) y proteínas animales (80-95 %) (Hughes *et al.*, 1996).

El contenido nutricional promedio por cada 100 g de frijol crudo (b.s.) es de 322 kilocalorías, 21.8 g de proteínas, 2.5 g de grasas y 55.4 g de carbohidratos. Además, esta leguminosa es una excelente fuente de minerales como hierro, calcio, zinc,

fósforo, potasio, magnesio, y vitaminas del complejo B, como la niacina, riboflavina, ácido fólico y tiamina (PROFECO, 2001).

Hay una gran variación en las cantidades de fibra dietética soluble e insoluble en legumbres (Tosh y Yada, 2010). En las legumbres crudas la fibra dietética va de 14 al 26 % (b.s.), mientras que en frijoles se encontró un contenido de fibra dietética total de 23 a 32 %. En la fibra contenida en legumbres se incluyen largas cadenas solubles e insolubles de polisacáridos, galacto-oligosacáridos y almidón resistente. La fibra insoluble es típicamente asociada con tener efecto laxante, la fibra soluble está vinculada con la reducción de niveles de colesterol y mejoras en el nivel de glucosa post-prandial en la sangre. La fibra puede funcionar como prebióticos, proporcionando alimento para microorganismos intestinales (Brummer *et al.*, 2015).

4.8 Componentes antinutricionales del frijol

De las principales sustancias químicas que interfieren con el aprovechamiento de los nutrientes del frijol destacan los inhibidores de tripsina, los taninos, las lectinas y el ácido fítico.

La baja digestibilidad del frijol a menudo se atribuye a factores antinutricionales, como inhibidores de tripsina, la hemaglutinina, taninos y ácido fítico (Antunes y Sgarbieri, 1980). Se presume que el contenido de taninos en frijol, es responsable de la baja digestibilidad de la proteína (Bressani y Elias, 1984). Sin embargo, Hughes *et al.* (1996), reportaron que los taninos de las dietas experimentales no mostraron un efecto consistente sobre la digestibilidad *in vitro* en frijol previamente cocido

La fibra dietética y los taninos son dos antinutrientes termoestables que se cree participan en la reducción del valor nutritivo de las proteínas de frijol. En este sentido, el frijol es rico en fibra dietética, tanto soluble como insoluble (Hughes y Swanson, 1989).

El contenido de taninos en frijol seco varía de 0.00 a 0.93 % (Deshpande *et al.*, 1986b). Los taninos son bien conocidos por su capacidad para unirse y precipitar proteínas (Aw y Swanson, 1985). Al respecto, se ha observado una débil correlación negativa entre los taninos y digestibilidad de la proteína de frijol (Durigan *et al.*, 1987).

La flatulencia asociada con los granos secos es causada principalmente por oligosacáridos, en particular rafinosa, estaquiosa y verbascosa (Vishalakshi *et al.*, 1980). Estos oligosacáridos no son digeridos por los seres humanos, debido a que carecen de la α -galactosidasa (enzima necesaria para su hidrólisis), por ello son metabolizados por las bacterias intestinales, produciendo dióxido de carbono, hidrógeno y metano, lo cual provoca la flatulencia (Becker *et al.*, 1974).

Sin embargo, Elizalde *et al.* (2009) declaran que a pesar del papel tóxico atribuido a los factores antinutricionales, diversos estudios revelan que pequeñas cantidades de factores antinutricionales pueden ser benéficos para la prevención o tratamiento de ciertas enfermedades, por lo que también se les puede llamar "compuestos no nutritivos" o "factores nutricionalmente bioactivos", si bien carecen de valor nutritivo, no resultan perjudiciales a dosis bajas como es posible encontrarlas en las formas de

preparación habituales para su consumo, como ejemplo por medio de cocción (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades funcionales de algunos factores antinutricionales.

Factor antinutricional	Efecto positivo
Oligosacáridos*	Producción de ácidos grasos de cadena corta y disminución en el pH intestinal.
Compuestos fenólicos**	Protectores contra el cáncer y las enfermedades cardiovasculares.
Saponinas***	Acción antimicótica, antiviral, anticancerígeno, hipocolesterolémica, hipoglicémica, antitrombótica, diurética, antiinflamatoria y molusquicida.
Ácido fítico ***	Reduce el colesterol sérico y los triglicéridos, suprime oxidación mediada por el hierro y previene algunos tipos de cáncer.
Inhibidores de tripsina****	Confieren protección contra rotavirus, inhiben carcinogénesis y pueden ser utilizados como agentes quimioprotectores.

Ramírez-Cárdenas *et al.* (2008)*, Campos-Vega *et al.*, 2009**, Elizalde *et al.*, 2009***, Guzmán-Maldonado *et al.*, 2002****.

Al desechar el agua de remojo del frijol puede eliminar un porcentaje de los compuestos antinutricionales. Algunos estudios (Oliveira *et al.*, 2001a, b; Ramírez-Cárdenas *et al.*, 2008) reportaron mayor reducción en el contenido de taninos, fitatos y oligosacáridos en frijoles cocidos sin usar el agua de remojo en la cocción.

4.9 Hidratación tradicional de frijol

El frijol necesita rehidratación antes de su consumo, tanto en la cocina como en la industria. El proceso de hidratación tradicional se realiza remojando el frijol en agua a temperatura ambiente, y este proceso puede durar 10-12 h (Naviglio *et al.*, 2013). El

remojo es utilizado antes de la cocción, como una estrategia para reducir el tiempo de cocción de los frijoles (Bellido *et al.*, 2006).

La hidratación tradicional realizada en la agroindustria presenta inconvenientes que han sido descritos por Carpi *et al.* (1997), principalmente pérdida de espacio, evaluación de calidad después del remojo, discontinuidad de la línea de producción, largo periodo de recuperación y problemas de higiene. Por lo tanto, la hidratación es una operación importante en el procesamiento de alimentos, la cual modifica la calidad del producto final y se usa antes de la cocción, extracción, fermentación y germinación (Oliveira *et al.*, 2013).

Dentro de la gran diversidad de artículos que se ha publicado sobre la hidratación de granos y semillas alimenticias destacan los siguientes: frijol (Piergiovanni, 2011; Kaptso *et al.*, 2008; Abu-Ghannam, N. y McKenna, B. *et al.*, 1997a), garbanzo (Gowen *et al.*, 2007; Ibarz *et al.*, 2004), maní bambara (Jideani y Mpotokwana, 2009; Kaptso *et al.*, 2008), arroz (Fonseca *et al.*, 2011; Cheevitsapon y Noomhom, 2011; Botelho *et al.*, 2010), lupino (Solomon, 2009), lentejas (Joshi *et al.*, 2010), maíz (Fernández-Muñoz *et al.*, 2011; Sobukola y Abayomi, 2011), soja (Coutinho *et al.*, 2010; Sopade y Obeka, 1990).

En la hidratación de frijol se ha utilizado el calor para elevar la temperatura y con ello reducir (Piergiovanni, 2011) el tiempo de hidratación, sin embargo en fechas más recientes se ha incursionado en tecnologías como la aplicación de altas presiones (Zanella *et al.*, 2014; Naviglio *et al.*, 2013) y ultrasonido (Ghafoor *et al.*, 2014).

4.10 Modelos matemáticos

Con el propósito de *determinar* las características de hidratación de granos y en *determinado* escenario *predecir* el contenido de humedad a un *determinado* tiempo se han desarrollado diversos modelos matemáticos (Ghafoor *et al.*, 2014). Estos modelos se dividen básicamente en empíricos y en teóricos. Los modelos empíricos se obtienen a partir de la correlación matemática simple de los datos experimentales (Yildirim *et al.*, 2010). Por otro lado, en los modelos teóricos se consideran los etapas elementales de difusión y/o la transferencia de masa (Yildirim *et al.*, 2011).

Dentro de los modelos empíricos más usados en predecir el comportamiento de hidratación de alimentos se encuentran el modelo de Peleg (Zanella-Díaz *et al.*, 2014, Naviglio *et al.*, 2013, Corzo *et al.*, 2012), Primer Orden (Gowen *et al.*, 2007), Sigmoide (Kaptso *et al.*, 2008, Oliveira *et al.*, 2013) y el de Weibull (Ghafoor *et al.*, 2014; Shafaei, *et al.*, 2014a; Prasad *et al.*, 2010).

4.11 Aplicación del ultrasonido en alimentos

4.11.1 Principios del ultrasonido

El ultrasonido se define como las ondas de sonido que tienen una frecuencia que excede el límite de audición del oído humano (> 20 kHz). Algunos animales utilizan el ultrasonido para navegación (delfines) o caza (murciélagos) usando la información de rebote de las ondas de sonido. Los efectos del ultrasonido se atribuyen principalmente a un fenómeno llamado cavitación, el cual se refiere a la formación,

crecimiento e implosión de pequeñas burbujas de gas o cavidades en un líquido cuando el ultrasonido viaja a través de éste (Erkan y Soysal, 2011). El ultrasonido es una de las tecnologías emergentes que fueron desarrolladas para minimizar el procesamiento, maximizar la calidad y asegurar la inocuidad de los productos alimenticios. El ultrasonido se aplica para impartir efectos positivos en el procesamiento de alimentos, tales como mejorar la transferencia de masa, conservación de alimentos, asistencia del tratamiento térmico y manipulación de textura y análisis de alimentos (Knorr *et al.*, 2011).

Cuando la energía acústica de alta intensidad viaja a través de un medio sólido, las ondas del sonido causan una serie de compresiones y rarefacciones rápidas y sucesivas, con velocidades en función de su frecuencia. A su vez, el material se somete a una serie rápida alternada de contracciones y expansiones, al igual que una esponja cuando se aprieta y se libera repetidamente (efecto de esponja). Este mecanismo, conocido como "difusión ratificada" es muy importante en las operaciones de transferencia de masa (Misra *et al.*, 2011). El efecto esponja causado por la aplicación de ultrasonido puede ser responsable de la creación de canales microscópicos en los granos, lo cual reduce la resistencia interna a la transferencia de masa (De la Fuente-Blanco *et al.*, 2006).

4.11.2 Clasificación del ultrasonido y usos en alimentos

Con base en el rango de frecuencia, la aplicación del ultrasonido en el procesamiento de alimentos, análisis y control de calidad de alimentos puede dividirse en alta y baja

energía. Así también el ultrasonido de baja energía tiene frecuencias superiores a 100 kHz e intensidades por debajo de 1 W-cm^2 , condiciones que pueden ser utilizadas para análisis no invasivos y monitoreo de varios materiales alimenticios durante el procesamiento y almacenamiento para asegurar una alta calidad e inocuidad (Awad *et al.*, 2012).

El ultrasonido de baja energía se ha utilizado para la evaluación de la composición de productos cárnicos crudos y fermentados, pescado y carne de cerdo. También se ha usado para control de calidad de productos vegetales frescos y frutas durante la pre y poscosecha, productos de panificación, geles alimenticios y productos espumados y congelados. Otras de las aplicaciones del ultrasonido es la evaluación de la adulteración y evaluación del estado de agregación de la miel, así como el tamaño y tipo de proteínas (Awad *et al.*, 2012).

Algunos parámetros como la frecuencia, temperatura, amplitud de onda y viscosidad del medio a tratar influyen en el grado de cavitación, sin embargo, la frecuencia es uno de los factores más importantes en la efectividad del ultrasonido (Patist y Bates, 2006). Para el procesamiento de alimentos se usa el ultrasonido de alta potencia que comprende de 20 a 100 kHz (Piyasena *et al.*, 2003). Se ha demostrado que a estas condiciones es donde se genera el mayor tamaño de burbuja, lo cual logra que la energía creada en la cavitación sea mayor (Salleh-Mack y Roberts, 2007).

Dentro del campo de los alimentos el ultrasonido ha sido útil en procesos como la extracción, cristalización, congelación, descongelación y el secado, siendo

beneficioso debido a que aumenta la eficiencia, reduce el tiempo y el aumenta el rendimiento (Chandrapala *et al.*, 2013).

4.11.3 Ultrasonido e hidratación de granos

Dado el efecto que tiene el ultrasonido en los fenómenos de transferencia de masa, se han realizado algunos estudios que demuestran su utilidad en operaciones de procesos de preparación de alimentos, como es el caso del remojo o hidratación de semillas de granos y cereales previa y/o durante su cocción. De acuerdo a Yildirin *et al.* (2011), el tratamiento con ultrasonido de baja frecuencia (25 kHz 100 W y 25 kHz 300 W) redujo significativamente el tiempo de remojo de garbanzos. En un estudio reciente, Janve *et al.* (2013) demostraron que la energía de ultrasonido de baja frecuencia (20 kHz) mejoró el proceso tradicional de nixtamización del maíz en términos de calidad y tiempo de operación. La hidratación asistida con ultrasonido también ha sido usado en frijol, demostrando su utilidad en frijol Navy para reducir significativamente el tiempo de remojo bajo condiciones de alta frecuencia (750 W 47 kHz) (Gafoor *et al.*, 2014).

En otro estudio, Ulloa *et al.* (2015) demostraron la utilidad del ultrasonido de alta frecuencia (130 W 40 kHz) en la reducción significativa del tiempo de remojo y cocción de seis de las principales variedades de frijol (Azufrado, Mayocoba, Flor de Mayo, Negro Jamapa, Garbancillo y Pinto) que se consumen en México, concluyendo que la extensión de tales reducciones depende de la variedad de frijol y el tiempo de exposición al ultrasonido.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materia prima y su preparación

Se utilizaron las variedades de frijol Negro Jamapa, Peruano, Mayocoba, Flor de Mayo, Pinto y Azufrado, las cuales son representativas del consumo nacional (Rodríguez-Licea *et al.*, 2010). El frijol fue adquirido en el mercado de abastos de la ciudad de Tepic, Nayarit, México y fue trasladado al Laboratorio de Análisis Proximal, del Centro de Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma de Nayarit, para su caracterización fisicoquímica. Las semillas se limpiaron y seleccionaron de forma manual para eliminar materia extraña y semillas dañadas.

5.2 Caracterización física y química del frijol

La composición química (humedad, proteína (N x 6.25), lípidos, cenizas y carbohidratos totales) de las semillas se determinó siguiendo los métodos oficiales de la AOAC (1990). Para la caracterización física se seleccionaron de forma aleatoria 100 semillas de cada variedad y se midieron las siguientes características: peso (p) con una balanza digital ES-200 (Esnova, Pekin, China) con una precisión de 0.001 g, largo (l), ancho (a) y grosor (g) con un calibrador Vernier (Mitutoyo, Tokio, Japón) con una precisión de 0.01 mm. Posteriormente se calculó el diámetro geométrico medio (Gm), diámetro aritmético medio (Am), diámetro cuadrado medio (Cm) y el radio calculado (r), de acuerdo a los métodos reportados por Gafhoor *et al.* (2014) mediante las siguientes ecuaciones:

$$Gm = (lag)^{1/3} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$Am = \frac{l+a+g}{3} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$r = \frac{1}{2} \left\{ \frac{Gm + Am + Cw}{3} \right\} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$Cm = \left(\frac{la+ag+lg}{3} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación (4)}$$

5.3 Contenido de cáscara

Para determinar el porcentaje de cáscara de las semillas se remojaron 30 granos de frijol en agua destilada durante 8 h y posteriormente se les retiró la cáscara manualmente, separándola del cotiledón. Ambos constituyentes fueron secados en un horno eléctrico a 60 °C durante 8 h. El porcentaje de cáscara (%Cs) fue calculado considerando la relación de la sumas del peso de las cáscaras (pCs) y cotiledones (pCf). Dados por la siguiente ecuación:

$$\%Cs = \frac{pCr}{pCr + pCs} 100 \quad \text{Ecuación (5)}$$

5.4 Tratamientos de remojo con ultrasonido

Se realizaron dos experimentos de remojo con tratamiento sónico, los cuales se describen a continuación

5.4.1 Tratamiento de remojo sónico de alta frecuencia (42 kHz)

En un vaso de precipitado de 600 ml se sumergió una muestra de 5 g de frijol en 500 ml de agua destilada y se trataron con ultrasonido en un equipo Branson 3510 (Branson, Danbury, Connecticut, USA), el cual cuenta con un tanque 5 L de capacidad (Tabla 2). Cada 10 min y hasta alcanzar humedad de equilibrio o saturación (H_e), los granos se retiraron del agua y escurrieron, para enseguida eliminarles el exceso de agua con toallas de papel, pesarse en una balanza digital ES-200 (Esnova, Pekín, China) y regresarse al agua para continuar su tratamiento de hidratación. Para fines de comparación se trabajó con un tratamiento control (sin ultrasonido). En el caso del tratamiento control el pesado de las semillas se realizó cada 30 min. El contenido de humedad a cada intervalo de tiempo ($H(t)$) se determinó a partir de la ganancia de peso, considerando la masa inicial de la muestra (M_0), la humedad (H), y la masa obtenida en cada intervalo de tiempo (M). El tratamiento de remojo se realizó por triplicado para cada variedad de frijol.

5.4.2 Tratamiento de remojo sónico de baja frecuencia (20 kHz)

En un vaso de precipitado de 100 ml se sumergió una muestra de 5 g de semillas de frijol en 50 ml de agua destilada y se trataron con ultrasonido en las condiciones que describe la Tabla 2, para lo cual se utilizó el equipo ultrasónico GE-130 Ultrasonic Processor (ColeParmer, Vernon Hills, Connecticut, Illinois, U.S.), el cual cuenta con una sonda de titanio de 6 mm de diámetro. Cada 10 min y hasta alcanzar humedad de equilibrio o saturación (H_e), los granos se retiraron del agua y escurrieron, para

enseguida eliminarles el exceso de agua con toallas de papel, pesarse en una balanza digital ES-200 (Esnova, Pekín, China) y regresarse al agua para continuar su tratamiento de hidratación. Para fines de comparación se trabajó con un tratamiento control (sin ultrasonido). En el caso del tratamiento control el pesado de las semillas se realizó cada 30 min. El contenido de humedad a cada intervalo de tiempo (H_t) se determinó a partir de la ganancia de peso, considerando la masa inicial de la muestra (M_0), la humedad (H). Los tratamientos de remojo se realizaron por triplicado para cada variedad de frijol.

Tabla 2. Condiciones del experimento para la hidratación de las distintas variedades de frijol.

Condiciones	Tratamientos				
	1	2	3	4	Control
Temperatura (°C)	30	30	30	30	30
Potencia (W)	100	5	12	19	-
Frecuencia (kHz)	42	20	20	20	-

5.5 Modelamiento de las cinéticas de hidratación

En el presente estudio se utilizaron cuatro modelos matemáticos: Peleg, Sigmoidal, Weibull y Primer Orden, los cuales son algunos de los más usados para predecir el comportamiento de hidratación de alimentos.

5.5.1 Modelo de Peleg

El modelo de Peleg es uno de los más utilizados para describir el fenómeno de hidratación de alimentos (Turhan *et al.*, 2012) y se encuentra descrito por la siguiente ecuación (6):

$$Ht = Ho + \frac{t}{c1+c2t} \quad \text{Ecuación (6)}$$

En donde Ht es el contenido de humedad (% b.s.) a un intervalo de tiempo de remojo, Ho es el contenido de humedad inicial (% b.s.), t es el tiempo en min, $c1$ (min) es la constante de velocidad de absorción (se refiere a la velocidad de absorción de la fase inicial) y $c2$ se refiere al máximo (o mínimo) contenido de humedad alcanzable (Corzo *et al.*, 2012).

5.5.2 Primer Orden

El modelo de Primer Orden se describe en la Ecuación (7):

$$\frac{Ho - Ht}{Ho - He} = 1 - \exp(-k1t) \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde Ht es el contenido de humedad (% b.s.) a un intervalo de tiempo de remojo, Ho es el contenido de humedad inicial (% b.s.), He es el contenido de humedad de equilibrio o de saturación (% b.s.), t es el tiempo en minutos y $k1$ es la constante de velocidad de absorción de agua (Cox *et al.*, 2012). Cuando β del modelo de Weibull

presenta un valor de 1, la ecuación que representa dicho modelo se transforma en el modelo de primer orden (Gafoor *et al.*, 2014).

5.5.3 Modelo Sigmoidal

El modelo Sigmoidal se describe en la Ecuación (8):

$$Ht = \frac{He}{1 + \exp[-k \cdot (t - \tau)]} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde Ht es el contenido de humedad (% b.s.) a un intervalo de tiempo de remojo, He es el contenido de humedad de equilibrio o de saturación (% b.s.), t es el tiempo en minutos, k (min^{-1}) es la constante de velocidad de absorción de agua y τ (min) se define como el tiempo necesario para alcanzar la saturación media (50 %) de las semillas (Kapsto *et al.*, 2008, Oliveira *et al.*, 2013).

5.5.4 Modelo de Weibull

El modelo Weibull se describe en la Ecuación (9):

$$\frac{Ho - Ht}{Ho - He} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde Ht es el contenido de humedad (% b.s.) a un intervalo de tiempo de remojo, Ho es el contenido de humedad inicial (% b.s.), t es el tiempo en min, He es el contenido de humedad de equilibrio o de saturación (% b.s.), el parámetro de escala, α (min), representa el tiempo necesario para llevar a cabo aproximadamente el 63 % del proceso y β es el parámetro de forma de la curva (Marabi *et al.*, 2003)

El procedimiento de ajuste y la obtención de los parámetros ($c1$, $c2$, $k1$, k , z , He , α y β) de los modelos utilizados fueron calculados por regresión no lineal, con el método Simplex-Quasi-Newton usando el paquete estadístico Statgraphics Plus 5.0 (Statistical Graphics Corp., MD, USA).

5.6 Selección del modelo matemático con mejor ajuste

Para determinar cual fue el modelo con la mejor bondad de ajuste se consideraron tres estimadores estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) y chi-cuadrada (χ^2). Por lo tanto, los valores más bajos de χ^2 y $RMSE$ asociado al valor más alto de R^2 (=1.0) fue el criterio con el que se determinó el modelo con el mejor ajuste (Cox *et al.*, 2012; Palipane y Driscoll, 1994).

Los estimadores estadísticos se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (HR_{exp,i} - HR_{pre,i})^2}{N-z} \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (HR_{exp,i} - HR_{pre,i})^2}{N}} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (HR_{exp,i} - HR_{exp,pre})^2 - \sum_{i=1}^N (HR_{exp,i} - HR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (HR_{exp,i} - HR_{exp,pre})^2} \quad \text{Ecuación (12)}$$

donde $HR_{exp,i}$ es la i -ésima relación de humedad experimental, $HR_{pre,i}$ es la i -ésima relación de humedad predicha, $HR_{exp,pre}$ es el contenido de humedad promedio observado, N es el número de la observación y z es el número de constantes.

5.7 Difusividad efectiva (D_{eff})

La D_{eff} se evaluó de acuerdo al método reportado por Kaptso *et al.* (2008), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde D_{eff} (m^2s^{-1}) es la difusividad efectiva, k (s^{-1}) es la constante de velocidad de absorción de agua del modelo matemático con el mejor ajuste y r (m) es el valor del radio calculado, obtenido en la Ecuación (3).

5.8 Análisis estadístico

Para determinar el efecto de la variedad de frijol en los valores obtenidos de la caracterización física (ρ , l , a , g , Gm , Am , Cm , r), química (humedad, proteína, lípidos, cenizas y carbohidratos totales), contenido de cáscara (%Cs) y de los parámetros cinéticos de los tratamientos de remojo (H_e y D_{eff}), se aplicó análisis de varianza de una vía (ANOVA) y prueba de comparación de medias Tukey, usando el paquete estadístico Statgraphics Plus 5.0 (Statistical Graphics Corp., MD, USA) y considerando un nivel de significancia $P < 0.05$.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización física y química del frijol

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de peso, ancho, grosor, largo, diámetro geométrico medio, diámetro aritmético medio, diámetro cuadrado medio, radio equivalente y % de cáscara de las seis variedades de frijol estudiadas. De acuerdo a los resultados obtenidos, el frijol de la variedad Azufrado presentó los valores más bajos en la gran mayoría de las propiedades físicas estudiadas, mientras que las variedades Mayocoba y Flor de Mayo presentaron los valores más altos. Sin embargo, destaca la variedad Flor de Mayo por ser la de mayor radio equivalente (0.41 cm), mientras que el frijol Azufrado fue el de menor radio equivalente (0.30 cm).

Tabla 3. Características físicas de semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris*).

Característica	Mayocoba ^a	Azufrado ^b	Pinto ^c	Peruano Rojo ^d	Flor de Mayo ^e	Negro Jamapa ^f
Peso (g)	0.39 ± 0.03 ^a	0.25 ± 0.02 ^b	0.36 ± 0.01 ^c	0.32 ± 0.04 ^d	0.35 ± 0.05 ^e	0.24 ± 0.04 ^d
Ancho (cm)	0.70 ± 0.04 ^{de}	0.66 ± 0.03 ^a	0.73 ± 0.05 ^b	0.72 ± 0.03 ^{bc}	0.76 ± 0.05 ^a	0.89 ± 0.08 ^d
Grosor (cm)	0.586 ± 0.05 ^a	0.47 ± 0.04 ^d	0.56 ± 0.05 ^b	0.61 ± 0.03 ^a	0.52 ± 0.04 ^d	0.53 ± 0.04 ^c
Largo (cm)	1.29 ± 0.06 ^a	1.08 ± 0.06 ^c	1.25 ± 0.08 ^b	1.03 ± 0.06 ^c	1.25 ± 0.01 ^b	0.96 ± 0.07 ^a
Diámetro geométrico medio (cm)	0.82 ± 0.04 ^a	0.70 ± 0.03 ^d	0.79 ± 0.04 ^{bc}	0.76 ± 0.03 ^c	0.79 ± 0.05 ^b	0.71 ± 0.04 ^b
Diámetro aritmético medio (cm)	0.86 ± 0.04 ^a	0.74 ± 0.03 ^d	0.85 ± 0.05 ^{bc}	0.78 ± 0.03 ^c	0.84 ± 0.06 ^b	0.73 ± 0.04 ^b
Diámetro cuadrado medio (cm)	0.41 ± 0.01 ^a	0.37 ± 0.01 ^b	0.41 ± 0.01 ^c	0.44 ± 0.02 ^b	0.47 ± 0.04 ^a	0.40 ± 0.03 ^c
Radio equivalente (cm)	0.35 ± 0.01 ^b	0.30 ± 0.00 ^e	0.34 ± 0.02 ^d	0.38 ± 0.01 ^b	0.41 ± 0.02 ^a	0.37 ± 0.02 ^c
% Cáscara	8.82 ± 0.62 ^b	7.56 ± 0.19 ^d	7.92 ± 0.36 ^b	7.48 ± 0.50 ^c	9.85 ± 0.62 ^{ab}	8.65 ± 0.02 ^a

Los valores de media ± desviación estándar, n=100, con superíndice diferente denotan las diferencias significativas por el test de varianza (P<0.05) Prueba Tukey.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la composición proximal de las seis variedades de frijol estudiadas, en la cual se muestra que el contenido de humedad varió de 8.9 a 12.9 %, siendo la variedad Negro Jamapa la de menor contenido de humedad, mientras que la variedad Mayocoba presentó el valor más alto ($P < 0.05$). En relación al contenido de grasa, el frijol Pinto presentó el valor más bajo (0.6 %), mientras que el valor más alto correspondió a la variedad Peruano Bola. Sin embargo, los contenidos de cenizas y proteína no presentaron diferencias significativas entre las distintas variedades de frijol estudiadas ($P < 0.05$).

Tabla 4. Composición química proximal de las semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris*).

Componente (%)	Mayocoba	Azufrado	Pinto	Peruano Bola	Flor de mayo	Negro Jamapa
Humedad	12.8 ± 0.1 ^a	11.2 ± 0.0 ^{bc}	11.0 ± 0.4 ^{bcd}	11.4 ± 0.3 ^b	9.5 ± 0.1 ^a	8.9 ± 0.1 ^a
Grasa	1.6 ± 0.4 ^{bc}	2.1 ± 0.2 ^c	0.6 ± 0.2 ^a	4.7 ± 0.5 ^d	1.0 ± 0.1 ^{ab}	1.5 ± 0.2 ^{bcd}
Cenizas	4.5 ± 0.1 ^a	4.8 ± 0.2 ^a	4.1 ± 0.1 ^a	4.5 ± 0.0 ^a	4.0 ± 0.2 ^a	4.6 ± 0.1 ^a
Proteína (N × 6.25)	23.5 ± 0.5 ^a	23.6 ± 0.1 ^a	23.9 ± 0.5 ^a	23.8 ± 0.4 ^a	23.2 ± 0.2 ^a	23.9 ± 0.5 ^a
Carbohidratos totales*	57.6 ± 0.5	58.3 ± 0.2	60.4 ± 0.5	55.6 ± 0.5	62.3 ± 0.17	61.1 ± 0.5

Los valores (media ± desviación estándar, n=3) para un componente con superíndice diferente denotan diferencias significativas entre las variedades ($P < 0.05$, Prueba de Tukey). *Calculados por diferencia.

5.2 Cinética de absorción de agua

La cinética de absorción de agua de las distintas variedades de frijol analizadas se muestra en la Figura 2. Todos los tratamientos de remojo sónico redujeron significativamente ($P < 0.05$) el tiempo para alcanzar la H_e , sin embargo en las variedades de frijol que presentaron mayor contenido de humedad inicial (Tabla 4), la reducción del tiempo fue aún mayor (Figura 2), indicando que a mayor contenido de

humedad inicial, menor es el tiempo que se requiere para el remojo. En general el tiempo para lograr la *He* fue diferente en los distintos tratamientos de remojo para cada variedad de frijol

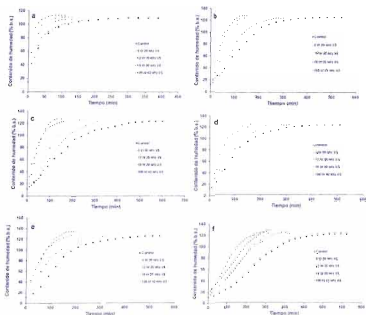


Figura 2. Cinéticas de hidratación por efecto de la energía de ultrasonido para las variedades de frijol (a) Mayocoba, (b) Azufrado, (c) Pinto, (d) Peruano Bola, (e) Flor de Mayo y (f) Negro Jamapa.

El frijol de las variedades Mayocoba, Azufrado y Peruano Bola presentaron una fase inicial de latencia o retardo (período de baja absorción de agua) en los tratamientos 2

y control, mientras que las variedades Pinto, Flor de Mayo y Negro Jamapa presentaron fase inicial de latencia los tratamientos 2, 3 y control (Figura 2).

Las cinéticas de hidratación del presente estudio que presentaron la fase inicial de latencia para las variedades de frijol en los tratamientos anteriormente señalados, concuerdan con lo observado en los experimentos de Oliveira *et al.* (2013) y Piergiovanni (2011), quienes concluyeron que el remojo de frijol a temperaturas relativamente bajas (25 °C- 55 °C) presentan ese tipo de cinética. Piergiovanni (2011) dividió en tres grupos las variedades de frijol en función de su velocidad de hidratación (rápida, intermedia y lenta); los resultados de ese estudio indicaron que los grupos de hidratación rápida e intermedia no presentan fase de latencia, a diferencia del grupo de lenta hidratación que fue caracterizado por mostrar dicha fase. De acuerdo al mismo estudio de Piergiovanni (2011) quedó demostrado que cuando el remojo se realiza a temperaturas de 45-55 °C la fase latencia desaparece, a diferencia de cuando se realiza a 25-35 °C. Sin embargo, en este estudio, los tratamientos de ultrasonido T1 y T4 mostraron un efecto similar al de la temperatura, es decir, desaparecieron la fase de latencia en todas las variedades de frijol, aun cuando la temperatura de remojo se mantuvo constante a 30°C.

El mejoramiento o aumento de la absorción de agua durante el remojo asistido con ultrasonido, puede ser debido a la formación de canales microscópicos en los granos, lo que reduce la resistencia interna a la transferencia de masa (De la Fuente-Blanco *et al.*, 2006) Janve *et al.* (2013) demostraron que la energía de ultrasonido

mejoró el proceso tradicional de nixtamalización del maíz en cuanto al tiempo absorción de agua y calcio.

Por otra parte, la cáscara de los granos o semillas, la cual se cree que es responsable de presentar inicialmente la resistencia al fenómeno de transferencia de masa (Katson *et al.* 2008), podría ser un factor limitante en la absorción de agua durante el remojo de granos. Como se observa en la Tabla 3, las variedades de frijol Flor de Mayo y Negro Jamapa presentaron las más altas proporciones de cáscara (8.65 % y 9.85 %, respectivamente), a la vez que coinciden con ser las variedades que presentaron el mayor tiempo para alcanzar el H_e .

En este estudio, el tratamiento de remojo asistido con ultrasonido de alta frecuencia (T1) presentó la mayor tasa de difusión de agua en la mayoría de las variedades de frijol estudiadas en comparación con el tratamiento de ultrasonido de baja frecuencia, lo que concuerda con lo reportado por Gafnoor *et al.* (2014) para frijol Navy y por Ulloa *et al.* (2015) para seis variedades de frijol consumidas en México.

6.3 Ajuste de las cinéticas de hidratación a los modelos matemáticos y selección del modelo con mejor ajuste

Con el uso de modelos matemáticos (empíricos o teóricos) es posible estimar la tasa de absorción de agua, la cual es directamente proporcional a la diferencia entre el contenido de humedad de saturación (H_e) y el contenido de humedad de los granos en un momento dado ($H(t)$) (Prasad, 2010). Aunque la mayoría de los estudios

se basan en la utilización de modelos teóricos para describir matemáticamente el transporte de agua líquida, dicho fenómeno no solamente puede ser descrito como un proceso de difusión (Khazaei y Mohammadi, 2009). Por lo tanto, resulta conveniente evaluar y predecir con modelos empíricos la cinética de hidratación.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los estimadores estadísticos del ajuste de las cinéticas de hidratación de las seis variedades de frijol a los cuatro modelos matemáticos implicados en el presente estudio. De acuerdo a dichos resultados, el modelo de Weibull presentó el mejor ajuste en la generalidad de las variedades, con los valores más altos de R^2 y más bajos de χ^2 y $RSME$ (Tabla 5), lo que coincide con Marabi *et al.*, 2003, quienes mencionan que dicho modelo es uno de los que mejor se ajusta cuando se busca evaluar el proceso de hidratación de diversos alimentos, ya sea que se encuentren sumergidos en agua o en soluciones acuosas, en función del tiempo y para definir sus efectos sobre la viscosidad, la sinéresis, la porosidad y las propiedades sensoriales de los productos ya hidratados.

El modelo de Peleg ha sido ampliamente utilizado en la modelación de la hidratación de frijol (Gafloor *et al.*, 2014; Navigo *et al.*, 2011; Abu-Ghannam y Mckenna, 1998). Sin embargo, a pesar de ser uno de los modelos más utilizados y aplicado satisfactoriamente en la hidratación de algunos alimentos, los datos experimentales de este estudio no se ajustaron adecuadamente al modelo de Peleg, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Estimadores estadísticos de los modelos matemáticos ajustados a las cinéticas de hidratación de las variedades de frijol Mayocoba, Azufrado, Pinto, Peruano Bola, Flor de Mayo y Negro Jamaica.

Modelo	Mayocoba		Azufrado		Pinto		Peruano Bola		Flor de Mayo		Negro Jamaica	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Significado												
T1	0.979	0.027	0.980	0.022	0.977	0.022	0.980	0.022	0.985	0.022	0.982	0.022
T2	0.979	0.029	0.986	0.026	0.978	0.025	0.988	0.025	0.982	0.022	0.986	0.021
T3	0.983	0.030	0.986	0.026	0.974	0.024	0.988	0.026	0.987	0.021	0.982	0.020
T4	0.983	0.027	0.986	0.026	0.987	0.024	0.987	0.025	0.982	0.021	0.984	0.021
TC	0.981	0.025	0.987	0.027	0.987	0.021	0.987	0.022	0.985	0.022	0.983	0.021
Piruetas												
T1	0.980	0.031	0.984	0.026	0.989	0.021	0.984	0.022	0.985	0.021	0.987	0.020
T2	0.980	0.031	0.984	0.026	0.989	0.021	0.984	0.022	0.985	0.021	0.987	0.020
T3	0.986	0.034	0.988	0.028	0.982	0.024	0.982	0.029	0.986	0.020	0.989	0.021
T4	0.981	0.027	0.988	0.026	0.981	0.025	0.987	0.026	0.982	0.021	0.984	0.020
TC	0.989	0.021	0.988	0.026	0.981	0.022	0.982	0.026	0.982	0.021	0.986	0.020
Pebón												
T1	0.983	0.021	0.984	0.020	0.986	0.021	0.978	0.021	0.986	0.021	0.985	0.020
T2	0.979	0.022	0.986	0.021	0.977	0.021	0.983	0.021	0.982	0.020	0.986	0.020
T3	0.984	0.026	0.978	0.021	0.985	0.021	0.981	0.021	0.986	0.020	0.983	0.020
T4	0.979	0.022	0.984	0.021	0.986	0.021	0.984	0.021	0.985	0.021	0.985	0.021
TC	0.984	0.020	0.982	0.020	0.982	0.020	0.984	0.020	0.982	0.020	0.985	0.020
Webull												
T1	0.984	0.021	0.987	0.020	0.980	0.020	0.983	0.020	0.988	0.020	0.984	0.020
T2	0.981	0.021	0.987	0.021	0.982	0.020	0.980	0.021	0.987	0.021	0.988	0.020
T3	0.986	0.022	0.988	0.020	0.979	0.020	0.984	0.021	0.986	0.021	0.987	0.020
T4	0.983	0.021	0.985	0.020	0.980	0.021	0.989	0.020	0.987	0.021	0.987	0.020
TC	0.989	0.020	0.987	0.020	0.985	0.020	0.983	0.020	0.985	0.021	0.985	0.020

T: Tratamiento

Piergiovanni (2011) menciona que en contraste con lo reportado en la literatura, el modelo de Peleg no es adecuado para describir la tasa de absorción de agua del frijol común, debido que no puede describir la fase de inicial latencia que se observa en la hidratación de algunos granos secos (Oliveira *et al.*, 2013). Lo anteriormente señalado, podría ser la razón de que en el presente estudio los datos experimentales de las cinéticas de hidratación para las distintas variedades de frijol no se ajustaron adecuadamente con el modelo de Peleg (Tabla 5).

Para el caso del modelo de Primer Orden, en el presente estudio los estimadores estadísticos mostraron valores relativamente altos de χ^2 y *RSME* y bajos de R^2 , por lo que al igual que en el modelo de Peleg, su aplicación bajo las condiciones experimentales empleadas, no resulta recomendable.

Por otra parte, el modelo Sigmoide (Ecuación 8) presentó un ajuste aceptable (Tabla 5), debido a que tal modelo puede describir la fase inicial de latencia seguida por una fase de alta tasa de absorción y, finalmente, por una fase estacionaria (Oliveira *et al.*, 2013). En todos los tratamientos de remojo sónico de frijol, el valor de r disminuyó y k aumentó, respecto al valor del tratamiento control.

En la Figura 3, se muestran la cinéticas de hidratación de frijol ajustadas al modelo de Weibull, las cuales mostraron una fase de latencia inicial, en congruencia con los resultados obtenidos por Machado *et al.* (1999), quienes afirman que dicho modelo predice la fase de retardo inicial cuando β presenta valores mayores a 1. En el presente estudio, el modelado de las cinéticas de absorción de agua de los

tratamientos de remojo de frijol, presentaron valores altos de β 0.827-1.995 (Tabla 8), lo cual sugiere que la fase de latencia está presente en la mayoría de los tratamientos.

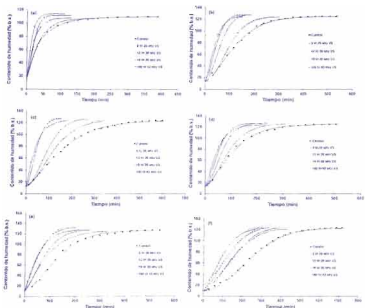


Figura 3. Cinéticas de hidratación por efecto de la energía de ultrasonido para las variedades de frijol (a) Mayacoba, (b) Azufrado, (c) Pinto, (d) Peruano Bola, (e) Flor de Mayo y (f) Negro Jamapa. Las líneas continuas representan los datos ajustados al Modelo de Weibull.

La distribución de Weibull se describe mediante dos parámetros: el parámetro de escala, α , que está relacionada con el recíproco de la constante de la velocidad del proceso, y el parámetro de forma de la curva, β . El parámetro de escala, α , representa el tiempo necesario para llevar a cabo aproximadamente el 63 % de hidratación total de las semillas. El inverso de α ($1/\alpha$) es la constante de velocidad de hidratación, obteniendo valores cercanos a los de k_1 del modelo de Primer orden (Tabla 6)

La literatura reporta que la velocidad de absorción de agua del frijol se incrementa proporcionalmente con el aumento de la temperatura (Shafaei *et al.*, 2014b). Sin embargo, aunque en el presente estudio se utilizó una temperatura fija de 30° C, el incremento de la potencia de ultrasonido (a una frecuencia de 20 kHz) en los tratamientos de remojo de frijol, aumentó proporcionalmente a la velocidad de absorción de agua (Figura 4), sugiriendo que el aumento de potencia de ultrasonido provoca un efecto similar al del aumento de temperatura.

Cabe señalar, que el tratamiento control presentó los valores más altos para α en todas las variedades estudiadas (Tabla 6) y que en cuanto a los tratamientos de remojo, el realizado con ultrasonido de alta frecuencia (T1) fue el que mostró el mayor valor de velocidad de absorción de agua ($1/\alpha$) en la mayoría de las variedades de frijol (excepto para el frijol Mayocoba).

Tabla 6. Constantes de los modelos matemáticos ajustados a las cinéticas de hidratación de las variedades de frijol Mayocoba, Azufrado, Pinto, Peruano Bola, Flor de Mayo y Negro Jamaica.

Modelo	β	Mayocoba	Azufrado	Pinto	Peruano bola	Flor de Mayo	Negro Jamaica
Sigmoid	T1	$\beta = 5.4 \times 10^3$ $r^2 = 0.93$	$\beta = 5.4 \times 10^3$ $r^2 = 0.93$	$\beta = 4.420 \times 10^2$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 4.473 \times 10^2$ $r^2 = 0.95$	$\beta = 3.551 \times 10^2$ $r^2 = 0.92$	$\beta = 2.148 \times 10^2$ $r^2 = 0.84$
	T2	$\beta = 5.423 \times 10^3$ $r^2 = 0.96$	$\beta = 2.966 \times 10^4$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 1.900 \times 10^2$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 2.371 \times 10^3$ $r^2 = 0.93$	$\beta = 2.267 \times 10^2$ $r^2 = 0.91$	$\beta = 1.408 \times 10^4$ $r^2 = 0.90$
	T3	$\beta = 24.834$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 104.57$ $r^2 = 0.83$	$\beta = 2.683 \times 10^2$ $r^2 = 0.92$	$\beta = 3.739 \times 10^2$ $r^2 = 0.95$	$\beta = 2.754 \times 10^2$ $r^2 = 0.95$	$\beta = 1.595 \times 10^4$ $r^2 = 0.90$
	T4	$\beta = 15.308$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 54.38$ $r^2 = 0.82$	$\beta = 5.103 \times 10^2$ $r^2 = 0.92$	$\beta = 4.524 \times 10^2$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 3.540 \times 10^2$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.659 \times 10^4$ $r^2 = 0.90$
	T5	$\beta = 10.305$ $r^2 = 0.93$	$\beta = 39.38$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 1.368$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 43.79$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 46.34$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 110.46$ $r^2 = 0.91$
	T6	$\beta = 5.261 \times 10^3$ $r^2 = 0.96$	$\beta = 1.740 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.201 \times 10^4$ $r^2 = 0.95$	$\beta = 2.034 \times 10^3$ $r^2 = 0.95$	$\beta = 1.603 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.111 \times 10^4$ $r^2 = 0.92$
	T7	$\beta = 26.006$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 104.3$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 13.75$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 87.45$ $r^2 = 0.95$	$\beta = 114.71$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 220.72$ $r^2 = 0.92$
	T8	$\beta = 4.540 \times 10^4$ $r^2 = 0.96$	$\beta = 2.311 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 2.200 \times 10^4$ $r^2 = 0.95$	$\beta = 1.091 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.808 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 9.47 \times 10^4$ $r^2 = 0.92$
	T9	$\beta = 2.711 \times 10^4$ $r^2 = 0.96$	$\beta = 0.345 \times 10^4$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 0.742 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.051 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.060 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 5.729 \times 10^4$ $r^2 = 0.92$
	T10	$\beta = 4.425 \times 10^4$ $r^2 = 0.96$	$\beta = 1.480 \times 10^4$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 0.865 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.422 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.219 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 6.975 \times 10^4$ $r^2 = 0.92$
	T11	$\beta = 6.848 \times 10^4$ $r^2 = 0.96$	$\beta = 2.090 \times 10^4$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 2.050 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.608 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.703 \times 10^4$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 7.121 \times 10^4$ $r^2 = 0.92$
T12	$\beta = 2.458 \times 10^5$ $r^2 = 0.96$	$\beta = 0.750 \times 10^5$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 0.576 \times 10^5$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 1.04445 \times 10^5$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 0.894 \times 10^5$ $r^2 = 0.94$	$\beta = 3.678 \times 10^5$ $r^2 = 0.92$	
Premsa orden	T1	$\beta = 17.745$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 28.418$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 33.79$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 38.95$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 43.12$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 110.85$ $r^2 = 0.84$
	T2	$\beta = 20.023$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 32.423$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 158.81$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 102.11$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 81.56$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 223.85$ $r^2 = 0.84$
	T3	$\beta = 18.095$ $r^2 = 0.88$	$\beta = 79.673$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 123.71$ $r^2 = 0.85$	$\beta = 89.25$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 79.58$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 234.07$ $r^2 = 0.84$
	T4	$\beta = 10.078$ $r^2 = 0.88$	$\beta = 54.001$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 51.48$ $r^2 = 0.85$	$\beta = 54.22$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 52.74$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 163.07$ $r^2 = 0.84$
	T5	$\beta = 23.519$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 123.56$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 160.67$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 100.51$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 123.87$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 309.86$ $r^2 = 0.84$
	T6	$\beta = 22.849$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 44.62$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 44.30$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 51.02$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 57.08$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 111.01$ $r^2 = 0.84$
	T7	$\beta = 37.404$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 110.53$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 139.35$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 102.95$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 96.96$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 182.24$ $r^2 = 0.84$
	T8	$\beta = 23.207$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 1.028$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.607$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 1.593$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.259$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 3.0121$ $r^2 = 0.84$
	T9	$\beta = 1.514$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 1.732$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.768$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 1.660$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.425$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.680$ $r^2 = 0.84$
	T10	$\beta = 15.019$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 52.64$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 51.57$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 58.37$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 62.35$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 146.32$ $r^2 = 0.84$
	T11	$\beta = 1.159$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 1.009$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.008$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 1.145$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.267$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.483$ $r^2 = 0.84$
T12	$\beta = 0.834$ $r^2 = 0.89$	$\beta = 1.483$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.326$ $r^2 = 0.86$	$\beta = 1.372$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.534$ $r^2 = 0.87$	$\beta = 1.995$ $r^2 = 0.84$	

*T12: 12 días

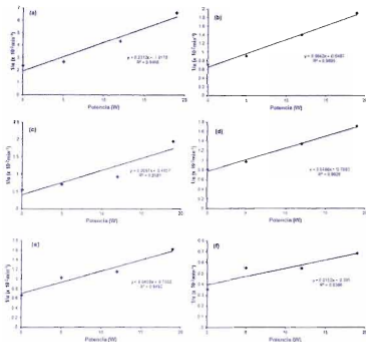


Figura 4. Efecto de la potencia de ultrasonido de baja frecuencia (20 kHz) en la velocidad de absorción de agua en el remojo de frijol Mayocoba (a), Azufrado (b), Pinto (c), Peruano Bola (d), Flor de mayo (e) y Negro Jamapa (f).

6.4 Efecto del contenido de cáscara en las propiedades de hidratación

El promedio del contenido de cáscara fue estimado en 8.82 ± 0.62 , 7.56 ± 0.19 , 7.92 ± 0.36 , 7.48 ± 0.50 , 9.85 ± 0.62 y 8.65 ± 0.02 % para las variedades de frijol

Mayocoba, Azufrado, Peruano Bola, Pinto, Flor de Mayo y Negro Jamapa, respectivamente.

De todas las variedades de frijol estudiadas, el Negro Jamapa y Flor de Mayo presentaron el mayor porcentaje de cáscara, seguidas de las Mayocoba, Azufrado, Pinto y Peruano Bola, cuyo % de cáscara no fue significativamente distinto ($P > 0.05$). Por otra parte, las variedades de frijol con mayor porcentaje de cáscara presentaron mayor ruptura por efecto del ultrasonido (Tabla 7). En las variedades de frijol Azufrado, Pinto, Peruano Bola, Flor de Mayo y Negro Jamapa el porcentaje de semillas con ruptura de cáscara aumentó conforme se incrementó la potencia de ultrasonido (5 W, 12 W y 19 W).

En este estudio, las variedades de frijol con mayor porcentaje de cáscara requirieron un mayor tiempo de remojo para alcanzar H_e , comportamiento similar al obtenido en otras semillas con remojo a diferentes temperaturas (Kaptson *et al.*, 2008).

Las variedades de frijol Flor de Mayo y Negro Jamapa que fueron sometidas a remojo asistido con ultrasonido de alta frecuencia (T1), presentaron mayor porcentaje de semillas con ruptura de cáscara, en comparación del tratamiento control (sin ultrasonido). De acuerdo a lo anterior, los resultados sugieren que el ultrasonido provoca rupturas en la cáscara de las semillas en función a la potencia y frecuencia de exposición. Es importante resaltar que las variedades Negro Jamapa y Flor de Mayo presentaron rupturas en todos los tratamientos de remojo, inclusive en el control, de tal modo que el porcentaje de semillas con ruptura de cáscara no solo

está determinado por las condiciones de los tratamientos a los que fueron sometidas, sino también se debe a la composición física y química de cada variedad (Pan *et al.*, 2010).

6.5 Contenido de humedad de equilibrio (*He*)

En el presente trabajo las variedades de frijol estudiadas presentaron un *He* que osciló de 107.18 a 133.99 % b.s. (Tabla 7). Abu-Ghannam y McKenna (1997b) reportaron un contenido de *He* de 125 % b.s. para frijol de la variedad Red Kidney en un tiempo de 800 min a una temperatura de remojo de 20 °C, lo cual resultó superior al valor obtenido para otras legumbres cuyo valor se mantienen cerca de 100 % b.s. (Clemente *et al.*, 1998; Deshpande y Cheryan, 1986a; Marques *et al.*, 2010).

El contenido de *He* de 110.08 %, 124.47 %, 123.72 %, 123.07 % (b.s.) de los tratamientos control para las variedades de frijol Mayocoba, Azufrado, Pinto y Negro Jamapa, respectivamente, aumentó a 113.98 %, 128.38 %, 127.69 % y 128.05 % (b.s.) por efecto del tratamiento de ultrasonido de baja frecuencia (T4)

Por otra parte, en la variedad Flor de Mayo los contenidos de *He* de los tratamientos T1, T3 y T4 fueron superiores a los contenidos de *He* de los tratamientos T2 y control. Según la literatura, se reporta que el incremento de temperatura en el remojo convencional aumenta significativamente el contenido de *He* en frijol (Shafaei *et al.*, 2014b), semillas de sésamo (Khazaei y Mohammadi, 2009), arroz (Cheevitsopon y Noomhorm, 2011) y maní bambara (Jideani y Mpotokwana, 2009). En similitud a lo anteriormente mencionado, en el presente estudio el remojo de frijol asistido con

ultrasonido aumentó la *H_e* con el aumento de la potencia de ultrasonido (excepto en la variedad Peruano Bola).

Tabla 7. Efecto del tratamiento de remojo en las propiedades de hidratación del frijol a 30°C.

Variedad/Propiedad	Tratamientos de remojo				Control
	100 W 42 kHz	5 W 20 kHz	12 W 20 kHz	19 W 20 kHz	
Mayocoba					
<i>H_e</i> (% g/g b.s.)	107.79 ^c	107.18 ^c	111.46 ^{ab}	113.98 ^a	110.08 ^b
Tiempo para alcanzar <i>H_e</i> (min)	110 ^a	173 ^b	108 ^c	82 ^d	330 ^a
Ruptura de cáscara (%)	-	-	-	-	-
<i>D_{se}</i> (x 10 ⁻¹⁰ m ² /s)	9.17 ^a	5.50 ^c	8.85 ^b	13.71 ^a	4.84 ^c
Azufrado					
<i>H_e</i> (% g/g b.s.)	125.07 ^a	124.32 ^b	128.60 ^a	128.38 ^a	124.47 ^b
Tiempo para alcanzar <i>H_e</i> (min)	137 ^{ab}	265 ^b	158 ^c	122 ^d	440 ^a
Ruptura de cáscara (%)	-	-	-	5 ^a	-
<i>D_{se}</i> (x 10 ⁻¹¹ m ² /s)	12.91 ^a	4.88 ^a	7.52 ^c	10.26 ^b	3.80 ^a
Pinto					
<i>H_e</i> (% g/g b.s.)	124.02 ^b	124.46 ^b	127.24 ^a	127.69 ^a	123.72 ^b
Tiempo para alcanzar <i>H_e</i> (min)	180 ^a	320 ^b	240 ^c	123 ^d	540 ^a
Ruptura de cáscara (%)	16.6 ^a	-	-	16.6 ^a	-
<i>D_{se}</i> (x 10 ⁻¹⁰ m ² /s)	4.46 ^a	1.41 ^d	1.83 ^c	3.84 ^b	1.09 ^e
Peruano bola					
<i>H_e</i> (% g/g b.s.)	124.17 ^a	125.08 ^a	127.18 ^a	126.96 ^a	124.47 ^a
Tiempo para alcanzar <i>H_e</i> (min)	201.86 ^{ab}	280 ^b	206.66 ^c	163.33 ^d	440 ^a
Ruptura de cáscara (%)	-	-	-	1.5 ^a	-
<i>D_{se}</i> (x 10 ⁻¹⁰ m ² /s)	5.27 ^a	2.61 ^b	4.16 ^a	4.63 ^a	2.13 ^b
Flor de mayo					
<i>H_e</i> (% g/g b.s.)	128.09 ^{ab}	125.59 ^b	128.39 ^{ab}	133.99 ^a	125.96 ^b
Tiempo para alcanzar <i>H_e</i> (min)	196.66 ^{ab}	296.66 ^b	233.33 ^c	173.33 ^d	480 ^a
Ruptura de cáscara (%)	15 ^a	29 ^b	40 ^a	49 ^a	15.53 ^c
<i>D_{se}</i> (x 10 ⁻¹⁰ m ² /s)	5.21 ^a	3.05 ^b	3.41 ^b	5.02 ^a	1.96 ^c
Negro Jamapa					
<i>H_e</i> (% g/g b.s.)	124.46 ^{bc}	124.68 ^{bc}	126.22 ^{ab}	128.05 ^a	123.07 ^c
Tiempo para alcanzar <i>H_e</i> (min)	280 ^a	396.66 ^b	360 ^c	313.33 ^d	660 ^a
Ruptura de cáscara (%)	9.43 ^a	10 ^a	13.33 ^a	21.66 ^a	1.66 ^b
<i>D_{se}</i> (x 10 ⁻¹¹ m ² /s)	20.98 ^a	12.87 ^c	12.75 ^c	16.07 ^b	7.11 ^d

% = porcentaje de semillas de frijol. Los datos representan el promedio de n=3.

Medias con el mismo superíndice a lo largo de las líneas no son significativamente diferentes (P < 0.05). Prueba Tukey

6.6 Efecto del ultrasonido en la difusividad efectiva (D_{eff}) durante el remojo sónico de frijol

Para calcular la D_{eff} (Ecuación 13) del frijol durante el remojo se utilizó la constante de velocidad de absorción de agua del modelo de Weibull ($1/\alpha$). Los tratamientos de ultrasonido de baja frecuencia (20 kHz) y alta frecuencia (42 kHz) mostraron valores diferentes de D_{eff} , parámetros cinéticos y forma de la curva (Tabla 6 y 7; Figura 3). Con el uso de ultrasonido de alta frecuencia en el remojo (T1), el valor de la D_{eff} fue significativamente mayor en las variedades de frijol Azufrado, Pinto y Negro Jamapa, mientras que la variedad Mayocoba presentó el mayor valor de D_{eff} con el tratamiento de ultrasonido de baja frecuencia (T4). La D_{eff} de las variedades Peruano Bola y Flor de Mayo fueron estadísticamente iguales en los tratamientos 1 y 4 (Tabla 7).

El mejor tratamiento de remojo asistido con ultrasonido aumentó la D_{eff} con respecto al tratamiento control de 4.84×10^{-10} a 13.71×10^{-10} , 3.80×10^{-11} a 12.91×10^{-11} , 1.09×10^{-10} a 4.46×10^{-10} , 2.13×10^{-10} a 5.27×10^{-10} , 1.96×10^{-10} a 5.21×10^{-10} , 7.11×10^{-11} a $20.98 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$ en las variedades Mayocoba, Azufrado, Pinto, Peruano Bola, Flor de Mayo y Negro Jamapa, respectivamente.

En un estudio reportado por Yildirim *et al.* (2013) con garbanzos, los valores de D_{eff} a 30 °C fueron 2.10×10^{-10} , 1.86×10^{-10} , 2.62×10^{-10} y $1.87 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$ para los tratamientos de remojo con ultrasonido 25 kHz 100 W, 40 kHz 100 W, 25 kHz 300 W y el control (sin ultrasonido), respectivamente.

7. CONCLUSIONES

La aplicación de ultrasonido redujo significativamente el tiempo de remojo en las seis variedades de frijol, sin embargo, tal reducción dependió de la variedad del frijol, potencia y frecuencia de ultrasonido utilizada, así como del tiempo de exposición al ultrasonido.

Las variedades de frijol con mayor contenido de humedad inicial requirieron menos tiempo para alcanzar H_e y en algunas de ellas los tratamientos de remojo asistido con ultrasonido aumentaron su valor.

En la mayoría de las variedades de frijol, el remojo asistido con ultrasonido de alta frecuencia aumentó los valores de D_{eff} .

En la mayoría de las variedades de frijol, en el remojo asistido con ultrasonido de baja frecuencia se observó que el incremento de la potencia redujo de manera proporcional el tiempo de hidratación.

De las variedades de frijol estudiadas, aquellas con mayor porcentaje de contenido de cáscara, presentaron el menor valor de D_{eff} , especialmente en el tratamiento de remojo control y los tratamientos de remojo con menor potencia de ultrasonido.

De los modelos utilizados en el presente estudio, el modelo de Weibull presentó la mejor bondad de ajuste a los datos experimentales de las cinéticas de hidratación en la mayoría de las variedades de frijol y condiciones de ultrasonido.

8. LITERATURA CITADA

- Abu-Ghannam, N. 1998. Modelling textural changes during the hydration process of red beans. *Journal of Food Engineering* 38:341–352.
- AOAC. 1990. Official methods of analysis (15th ed.) Arlington, VI: Association of Official Analytical Chemists.
- Abu-Ghannam, N. and McKenna, B. 1997a. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Engineering* 32:391-401.
- Abu-Ghannam, N. and McKenna, B. 1997b. Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Science* 62:520-523.
- Acosta-Gallegos, J.A., Rosales-Sierra, R., Navarrete-Maya, R. y López-Salinas, E. 2000. Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para condiciones de riego y temporal en México. *Agricultura Técnica en México* 26:79-98.
- Antunes, P.L. and Sgarbieri, V.C. 1980. Effect of heat treatment on the toxicity and nutritive value of dry bean (*Phaseolus vulgaris* var Rosinha G2) proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 28:935-938.
- Arias-Restrepo, J.H., Rengifo-Martínez, T. y Jaramillo-Carmona, M. 2007. Buenas prácticas apícolas (BPA) en la producción del frijol voluble. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Colombia.

- Aw, T.L. and Swanson, B.G. 1985. Influence of tannin on *Phaseolus vulgaris* protein digestibility. *Journal Food Science* 50:67-71.
- Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D. and Youssef, M.M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International* 48:410-427.
- Barrios-Gómez, E.J., López-Castañeda, C., Kohashi-Shibata, J., Acosta-Gallegos, J.A., Miranda-Colín, S. y Mayek-Pérez, N. 2010. Rendimiento de semilla, y sus componentes en frijol flor de mayo en el Centro de México. *Agrociencia* 44:481-489.
- Becker, R., Olson, A.C., Frederick, D.P., Kon, P.S., Gumbmann, M.R. and Wagner, J.R. 1974. Conditions for the autolysis of alpha-galactosides and phytic acid in California small beans. *Journal Food Science* 39:766-769.
- Bellido, G., Arntfield, S. D., Cenkowski, S. and Scanlon, M. 2006. Effects of micronization pretreatments on the physicochemical properties of navy and black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *LWT-Food Science and Technology* 39:779-787.
- Bello-Pérez, L.A. and Paredes-López, O. 2009. Starches of some food crops, changes during processing and their nutraceutical potential. *Food Engineering Reviews* 1:50-65.
- Boland, M., Daniel, S., Katz, J., Parcell, J. and Aristizabal, I. R. 1998. The 21st Century Alliance: A Dry Edible Bean Cooperative Review of Agricultural Economics 20 854-865.

Botelho, F.M., Corrêa, P.C., Goneli, A.L.D., Martins, M.A. y Baptestine, F.M. 2010. Análise de hidratação do arroz na parboilização. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 30:713-718.

Bressani, R. y Elias, L.G. 1984. Relación entre la digestibilidad y el valor proteínico del frijol común (*Phaseolus vulgaris*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 34:189-197.

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

Calva-Téllez, J.L., Rindermann, R.S. y Gómez-Cruz, M.A. 2006 [monografía en internet] La Economía Mexicana en el Décimo Año del TLCAN y Reflexiones sobre la Agricultura. [consultado 2013 noviembre 01]. Disponible en: www.fdc-berlin.de/fileadmin/fdcl/rita052004.pdf

Camacho-Espinoza, M.K., Peinado-Guevara, L.I., López-Valenzuela, J.A., Valdez-Ortiz, A., Salinas-Pérez R.A., Moreno-Herrera C.G., y Medina-Godoy, S. 2010. Caracterización proteómica de granos de frijol azufrado (*Phaseolus vulgaris*) cultivados en el estado de Sinaloa. *Ra Ximhai* 6:23-36.

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

Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Benedito, J. and Mulet, A. 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering* 110:200-207.

Carmona-García, R. 2005. Efecto del tipo de remojo en la digestibilidad del almidón en frijol cocido. Tesis de Maestría. Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos. Instituto Politécnico Nacional, Distrito Federal, México.

Carpi, G., Volpe, F., and Rovere, P. 1997. Quick rehydration of dry legumes for canning. *Industria Conserve* 72:144-150.

Castillo-González, F., Castillo-Mendoza, M., Miranda-Colln, S. y Ramírez-Vallejo P. 2006. Diversidad morfológica de poblaciones nativas de frijol común y frijol ayocote del oriente del Estado de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29:111-119.

Chandrapala, J., Oliver, C.M., Kentish, S. and Ashokkumar, M. 2013. Use of power ultrasound to improve extraction and modify phase transitions in food processing. *Food Reviews International* 29:67-91.

Cheevitsophon, E. and Noomhorm, A. 2011. Kinetics of hydration and dimensional changes of brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation* 35:840-849.

Clemente, A., Sánchez-Vioque, R., Vioque, J., Bautista, J. and Millán, F. 1998. Effect of processing on water absorption and softening kinetics in chickpea (*Cicer arietinum* L.) seeds. *Journal of Food Science and Agriculture* 78:169-174.

Corzo, O., Bracho, N. and Rodríguez, J. 2012. Comparison of Peleg and Azuara et al. models in the modeling mass transfer during pile salting of goat sheets. *LWT-Food Science and Technology* 46:448-452.

Coutinho, M.R., Omoto, E.S., dos Santos Conceição, W.A., Andrade, C.M.G., and Jorge, L.M.M. 2010. Evaluation of two mathematical models applied to soybean hydration. *International Journal of Food Engineering*. Doi:10.2202/1556-3758.1732.

Cox, S., Gupta, S. and Abu-Ghannam, N. 2012. Effect of different rehydration temperatures on the moisture, content of phenolic compounds, antioxidant capacity and textural properties of edible Irish brown seaweed. *LWT-Food Science and Technology* 47:300-307.

De Godínez, C.M., Bressani, R. and Malgar, M. 1992. Apparent digestibility of bean protein evaluated in humans, rats and in vitro assays. *Nutrition Research* 12:235-246

De la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco, S.E., Acosta-Aparicio, V.M., Blanco-Blanco, A. and Gallego-Juárez, J.A. 2006. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics* 44:e523–e527.

Deshpande, S.S. and Cheryan, M. 1986a. Microstructure and water uptake of *Phaseolus* and winged beans. *Journal of Food Science* 51:1218-1223.

Deshpande, S.S., Cheryan, M. and Salunkhe, D.K. 1986b. Tannin analysis of food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 24(4): 401-449.

Distrito Federal, México. PROFECO. 2001. "Si de bayos y negros se trata... calidad de frijoles enlatados. Información sobre calidad de diferentes marcas comerciales de frijol de lata". Revista del consumidor. No. 296. Octubre 2001. Procuraduría Federal del Consumidor.

Durigan, J.F., Sgarbieri, V.C. and Bulisani, E.A. 1987. Protein value of dry bean cultivars: factors interfering with biological utilization. *Journal Agriculture Food Chemistry* 35:694-698

Elizalde, A.D.D., Porrilla, Y.P. y Chaparro, D.C.C. 2009. Factores antinutricionales en semillas. *Ciencias Agropecuarias* 7:45-54.

Erkan, S.S. and Soysal, C. 2011. Effect of ultrasound and temperature on tomato peroxidase. *Ultrasonics Sonochemistry* 18:689-695.

FAO. 2005. [monografía en internet]. *Statistical Databases. Food and Agricultural Organization of United Nations*

Fernández-Muñoz, J.L., Acosta-Osorio, A.A., Gruntal-Santos, M.A. and Zetaya-Angel, O. 2011. Kinetics of water diffusion in corn grain during the alkaline cooking at diferente temperatures and calcium hydroxide concentration. *Journal of Food Engineering* 106:60-64

Fonseca, F.A., Soares Júnior, M.S., Caliani, M., Bassinello, P.Z., Eifert, E.C. and Garcia, D.M. 2011. Changes occuring during the parboiling of upland rice and in the

maceration water at diferente temperatures and soaking times. International Journal of Food Science and Technology 46:1912–1920.

García-Salazar, J.A., Rodríguez-Licea, G., Sáenz-Torres, A. y Rebollar-Rebollar, S. 2006. Políticas para mejorar la competitividad de la producción de maíz y frijol en México. Revista Fitotecnia Mexicana 2:115-121.

Ghafoor, M., Misra, N.N., Mahadevan, K. and Tiwari, B.K. 2014. Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). Ultrasonics Sonochemistry 21:409-414.

Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J. and Oliveira, J. 2007. Modelling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L.)-The effect of blanching pretreatment on water intake and texture kinetics. Journal of Food Engineering 78:810–819.

Guzmán-Maldonado, S.H., Acosta-Gallegos, J.A., Álvarez-Muñoz, A., García-Delgado, S. y Loarca-Piña, G. 2002. Calidad alimentaria y potencial nutraceutico del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Agricultura Técnica en México 28:159-173.

Hughes, J.S. and Swanson, B.G. 1989. Soluble and insoluble dietary fiber in cooked common bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds. Food Microstructure 8:15-21.

Hughes, J.S., Acevedo, E., Bressani, R. and Swanson, B.G. 1996. Effects of dietary fiber and tannins on protein utilization in dry beans (*Phaseolus vulgaris*). Food Research International 29:331-338.

Ibarz, A., González, C., and Barbosa-Cánovas, G.V. 2004. Kinetic models for water adsorption and cooking time in chickpea soaked and treated by high pressure. *Journal of Food Engineering* 63:467-472.

Janve, B., Yang, W., Kozman, A., Sims, C., Teixeira, A., Gunderson, M.A. and Rababah, T.M. 2013. Enhancement of corn nixtamalization by power ultrasound. *Food and Bioprocess Technology* 6:1269-1280.

Jideani, V.A. and Mpotokwana, S.M. 2009. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. *Journal of Food Engineering* 92:182-188.

Joshi, M., Adhikari, B., Panozzo, J. and Aldred, P. 2010. Water uptake and its impact on the texture of lentils (*Lens culinaris*). *Journal of Food Engineering* 100:61-69.

Kapso, K.G., Njintang, Y.N., Komnei, A.E., Hounhouigan, J., Scher, J. and Mbofung, C.M.F. 2008. Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and bambara groundnuts (*Voandzeia subterranea*) seeds. *Journal of Food Engineering* 86:91-99.

Khazaei, J. and Mohammadi, N. 2009. Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Food Engineering* 91:542-552.

Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., and Lee, D.U. 2004. Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology* 15:261-266.

Machado, M.F., Oliveira, F.A. and Cunha, L.M. 1999. Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by ready-to-eat breakfast cereal. *International Journal of Food Science & Technology* 34:47-57.

Marabi, A., Livings, S., Jacobson, M. and Saguy, I.S. 2003. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research & Technology* 217:311-318.

Marques, M., Jaeger, L.M., Regini, M., Viana, J.L., Hohn, A.R. and Gomes, E.M. 2010. Water absorption, hard shell and cooking time of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *African Journal of Food Science and Technology* 1:013-020.

Sánchez-Rodríguez, G., Manriquez-Núñez, J. A., Martínez-Mendoza, F. A. y López-Ibarra, L. A. 2001. El frijol en México competitividad y oportunidades de desarrollo. *Boletín informativo FIRA*, No. 316, Vol. XXXIII.

México. SAGARPA. 2008. Sistema Producto Frijol Plan Rector. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

México. SAGARPA-SIACON. 2004. [monografía en internet] Superficie cosechada y producción de frijol anual en México. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta [consultado 2013 noviembre 01] Disponible en: <<http://www.campomexicano.gob.mx/siacon>>

México. SIAP-SAGARPA. 2003. [monografía en internet] Cierre de la producción agrícola por cultivo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y

Alimentación-Sistema de Información Agroalimentario y Pesquero. [consultado 2013 noviembre 01]. Disponible en:

http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350

México. SIAP-SAGARPA. 2010. [monografía en internet]. Cierre de la producción agrícola por cultivo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema de Información Agroalimentario y Pesquero. [consultado 2013 noviembre 01]. Disponible en:

http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350

México. SIAP-SAGARPA. 2013. [monografía en internet]. Cierre de la producción agrícola por cultivo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema de Información Agroalimentario y Pesquero. [consultado 2013 noviembre 01]. Disponible en:

http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350

Misra, N.N., Pankaj, S.K. and Kadam, S.U. 2011. Introduction, acoustic fields in food processing-fundamentals and applications, VDM Publishing House, Alemania, pp 96

Naviglio, D., Formato, A., Pucillo, G.P., and Gallo, M. 2013. A cyclically pressurised soaking process for the hydration and aromatisation of cannellini beans. *Journal of Food Engineering* 116:765-774.

Oliveira, A.C., Carraro, F., Reis, S.M.P.M., Ramos, A.G., Helbig, E., Costa, E.L.D., Alvim, I.D., Queiroz, K.D.S. and Luvielmo, M.D.M. 2001a. The elimination of the not

absorbed water during common bean soaking resulted in weight gain in rats. *Brazilian Journal of Nutrition* 14:153-155.

Oliveira, A.C., Queiroz, K.S., Helbig, E., Reis, S.M.P.M. and Carraro, F. 2001b. The domestic processing of the common bean resulted in a reduction in the phytates and tannins antinutritional factors, in the starch content and in the raffinose, stachiose and verbascose flatulence factors. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 51:276-283.

Oliveira, A.L., Colnaghi, B.G., da Silva, E.Z., Gouvêa, I.R., Vieira, R.L. and Augusto, P.E.D. 2013. Modelling the effect of temperature on the hydration kinetic of adzuki beans (*Vigna angularis*). *Journal of Food Engineering* 118:417-420.

Palipane, K.B., and Driscoll, R.H. 1994. The thin layer drying characteristics of macadamia in shell nuts and kernels. *Journal of Food Engineering* 23:129-144.

Patis, A. and Bates, D. 2008. Ultrasonics innovations in the food industry: from the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 9:147-154.

Piergiovanni, A.R. 2011. Kinetic of water adsorption in common bean: considerations on the suitability of Peleg's model for describing bean hydration. *Journal of Food Processing and Preservation* 35:447-452.

Piyasena, P., Mohareb, E. and Mckellar, R. 2003. Inactivation of microbes using ultrasound: a review. *International Journal of Food Microbiology* 87:207-216.

- Prasad, K., Vairagar, P.R. and Bera, M.B. 2010. Temperature dependent hydration kinetics of *Cicer arietinum* splits. *Food Research International* 43:483-488.
- Pan, Z., Atungulu, G. G., Wei, L. and Haff, R. 2010. Development of impact acoustic detection and density separations methods for production of high quality processed beans. *Journal of Food Engineering*, 97:292-300.
- Ramírez-Cárdenas, L., Leonel, A.J. and Costa, N.M.B. 2008. Effect of domestic processing on nutrient and antinutritional factor content in different cultivars of common beans. *Ciencia e Tecnología de Alimentos* 28:200-213.
- Robles-Ozuna, L.E. y Ochoa-Martínez, L.A. 2012. Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología postcosecha* 13:109-122.
- Rodríguez-Licea, G., García-Salazar, J.A., Rebollar-Rebollar, S. y Cruz-Contreras, A.C. 2010. Preferencias del consumidor de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México: factores y características que influyen en la decisión de compra diferenciada por tipo y variedad. *Paradigma Económico* 1:121-145.
- Saha, S., Singh, G., Mahajan, V. and Gupta, H.S. 2009. Variability of nutritional and cooking quality in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as a function of genotype. *Plant Foods for Human Nutrition* 64: 174-180.

Salleh-Mack, S. and Roberts, J. 2007. Ultrasound pasteurization: the effects of temperature, soluble solids, organic acids and pH on the inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922. *Ultrasonics Sonochemistry* 14:323-329.

Shafaei, S.M. and Masoumi, A.A. 2014a. Studying and Modeling of Hydration Kinetics in Chickpea Seeds (*Cicer arietinum* L.). *Agricultural Communications* 2:15-21.

Shafaei, S.M., Masoumi, A.A. and Roshan, H. 2014b. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. Available online 6 September 2014.

Sharples, J. and Milham, N. 1990. Long-run Competitiveness of Australian Agriculture. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. Foreign Agricultural Economic Report No. 243. Washington.

Singh, S.P. 2007. Drought resistance in the race Durango dry bean landraces and cultivars. *Agronomy Journal* 99 1219-1225.

Sobukola, O.P. and Abayomi, H.T. 2011. Physical properties and rehydration characteristics of different varieties of maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation* 35:299-307.

Solomon, W.K. 2009. Hydration kinetics of roasted lupin (*Lupinus albus*) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation* 22:214-225

Sopade, P.A. and Obeka, J.A. 1990. Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg's Equation. *Journal of Food Science* 55:1084-1087.

Tosh, S.M., and Yada, S. 2010. Dietary fibres in pulse seeds and fractions: Characterization, functional attributes, and applications. *Food Research International* 43:450-460.

Turhan, M., Sayar S. and Gunasekaran, S. 2002. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *Journal of Food Engineering* 53:153-159.

Ulloa, J.A., Bonilla-Sánchez, C.R., Ortiz-Jiménez, M.A., Rosas-Ulloa, P., Ramírez-Ramírez, J.C. and Ulloa-Rangel, B.E. 2013. Rehydration properties of precooked whole beans (*Phaseolus vulgaris*) dehydrated at room temperature. *CyTA-Journal of Food* 11:94-99.

Ulloa, J.A., Enriquez López, K.V., Contreras Morales, Y.B., Rosas Ulloa, P., Ramirez Ramirez, J.C., & Ulloa Rangel, B.E. 2015. Effect of ultrasound treatment on the hydration kinetics and cooking times of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *CyTA-Journal of Food*. Available online 13 April 2015.

Vishalakshi, I., Salunkhe, D.K., Sathe, S.K. and Rockland LB. 1980. Quick-cooking beans (*Phaseolus vulgaris*): II. Phytates, oligosaccharides and antienzymes. *Plant Foods for Human Nutrition* 30:45-52

Yildirim A., Öner, M.B. and Bayram, M. 2011. Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. *Journal of Food Engineering* 104:134-14.

Yildirim, A., ÖNER, M. D. and Bayram, M. 2010. Modeling of water absorption of ultrasound applied chickpeas (*Cicer arietinum* L.) using Peleg's equation. *Journal of Agricultural Sciences* 16:278-286.

Zanella-Díaz, E., Mújica-Paz, H., Soto-Caballero, M.C., Welti-Chanes, J. and Valdez-Fragoso, A. 2014. Quick hydration of tepary (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) driven by pressure gradients. *LWT-Food Science and Technology* 59:800-805.

