



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EFECTO DEL ULTRASONIDO SOBRE LA HIDRATACIÓN Y CALIDAD NUTRICIONAL EN LA COCCIÓN DEL FRÍJOL COMÚN (*Phaseolus vulgaris*)

Juan Camilo Orozco Ágredo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Palmira, Colombia

2023

EFECTO DEL ULTRASONIDO SOBRE LA HIDRATACIÓN Y CALIDAD NUTRICIONAL EN LA COCCIÓN DEL FRÍJOL COMÚN (*Phaseolus vulgaris*)

Juan Camilo Orozco Ágredo

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Agroindustrial

Director:

Ingeniero Agroindustrial, PhD. Luis Eduardo Ordóñez Santos

Co-director:

Químico, MEng. Luis Fernando Londoño Hernandez

Línea de Investigación:

Agroindustria de productos alimentarios

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Administración

Palmira, Colombia

2023

A Dios

A mis padres Luz Mary Agredo y Juan Orozco

A mi hermana María Alejandra Orozco

A mi esposa Juliet Cardona

*“La ciencia está hecha de errores, errores
útiles de cometer, ya que nos acercan poco a
poco hacia la verdad”.*

Jules Verne

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre

Fecha DD/MM/AAAA

Fecha

Agradecimientos

A Dios por ponerme grandes personas en mi camino.

Al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y al programa de cultivos biofortificados HarvestPlus por su contribución en mi formación personal y profesional como investigador y por proveer económicamente al desarrollo de este proyecto.

A Moralba Dominguez García por darme la oportunidad de ser parte del Laboratorio de Calidad Nutricional y creer en mi potencial como persona y como futuro profesional, aun siendo en ese entonces estudiante de pregrado.

A Luis Fernando Londoño Hernández por su empatía, carisma y liderazgo, contribuyendo en gran medida en mi crecimiento personal y profesional durante todo este tiempo laborado en el CIAT.

A los profesores de maestría Luis Eduardo Ordoñez-Santos por su colaboración en la dirección de este proyecto y a Luis Fernando Delgado por su asesoría sin interés alguno en la parte de estadística y manejo de datos de este proyecto.

A los compañeros y ex-compañeros del laboratorio de calidad nutricional Angélica María Jaramillo Valencia, Gerver Patiño Lénis, Luis Fernando Londoño Hernández, Sonia Gallego Castillo y Daniel Álvarez que de alguna forma contribuyeron con el desarrollo de este proyecto.

A todas las personas que fueron imprescindibles para culminar este proyecto.

Resumen

El frijol común (*Phaseolus vulgaris*) es uno de los cultivos alimentarios más importantes a nivel mundial y su producción se extiende en diferentes regiones de América latina, África, Europa y Asia oriental, debido a su facilidad de siembra en diversos ambientes. Además, el frijol es un componente esencial en la dieta humana por su alto contenido nutricional y su fácil acceso a la población rural y urbana de bajos recursos. Sin embargo, los procesos de preparación de este alimento pueden ser extensos, logrando afectar la calidad nutricional de este. Se estudió la implementación del ultrasonido como herramienta de optimización en el proceso de hidratación de dos variedades de frijol (BIO101 y Nima-Calima), su efecto en el proceso de cocción y en la calidad nutricional. Para ello, se analizó los comportamientos de hidratación convencional (HC) e hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido (HCPU), esta última siendo optimizada mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR). Se encontró que el modelo de Kaptso y el modelo de Weibull fueron los modelos que mejor se ajustaron a las cinéticas de hidratación obtenidas. El tiempo de hidratación adecuado (t_{ha}) mediante el método de HCPU, fue significativamente menor con respecto al método de HC en ambas variedades de frijol ($p < 0.05$). El método HCPU tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) en el tiempo de cocción (t_c) con respecto al método HC para la variedad BIO101. Sin embargo, fue no significativo para la variedad Nima-Calima. Se encontró que la mayoría de los compuestos nutricionales analizados no se vieron afectados por el método de hidratación implementado. Este estudio permitió conocer que la implementación del ultrasonido en los procesos de hidratación del frijol común mejora el t_{ha} sin afectar el contenido nutricional.

Palabras clave: frijol común, nutrientes, ultrasonido, hidratación, cocción

Abstract

Effect of ultrasound on hydration and nutritional quality in cooking common bean (*Phaseolus vulgaris*)

Common bean (*Phaseolus vulgaris*) is one of the most important food crops worldwide and its production extends to different regions of Latin America, Africa, Europe and East Asia, due to its ease of planting in various environments. In addition, beans are an essential component in the human diet due to their high nutritional content and their easy access to low-income rural and urban populations. However, the preparation processes of this food can be extensive, affecting its nutritional quality. The implementation of ultrasound was presented as an optimization tool in the hydration process of two bean varieties (BIO101 and Nima-Calima), its effect on the cooking process and nutritional quality. For this, the behaviors of conventional hydration (HC) and conventional hydration pre-treated with ultrasound (HCPU) were analyzed, the latter being optimized using the response surface (MSR) methodology. It was found that the Kaptso model and the Weibull model were the models that best fit the hydration kinetics obtained. The adequate hydration time (t_{ha}) using the HCPU method was significantly lower than the HC method in both bean varieties ($p < 0.05$). The HCPU method had a significant effect ($p < 0.05$) on the cooking time (t_c) with respect to the HC method for the BIO101 variety. However, it was not significant for the Nima-Calima variety. It was found that most of the nutritional compounds analyzed were not affected by the hydration method implemented. This study allowed us to know that the implementation of ultrasound in the hydration processes of common beans improves the t_{ha} without affecting the nutritional content.

Keywords: common bean, nutrients, ultrasound, hydration, cooking

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	4
1.1 Definición del problema	4
1.2 Pregunta problema.....	5
1.3 Hipótesis	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
2. Estado del arte	10
3. Marco teórico	14
3.1 Condiciones climatológicas y ciclo fenológico del cultivo de fríjol	14
3.2 Composición nutricional del fríjol común	16
3.2.1 Micronutrientes	16
3.2.2 Macronutrientes	17
3.2.3 Compuestos antinutricionales	18
3.3 Procesos de preparación domésticos e industriales del fríjol común	20
3.4 Hidratación y modelos de hidratación.....	21
3.4.1 Características de la semilla que influyen en la hidratación	21
3.4.2 Modelos matemáticos para describir la cinética de hidratación	23
3.5 Ultrasonido	25
3.5.1 Principios básicos de las ondas sonoras	25
3.5.2 Generadores de ultrasonido.....	27
3.5.3 Ultrasonidos y cavitación	28
3.5.4 Aplicaciones del ultrasonido en la industria alimentaria	30
3.5.5 El ultrasonido en la hidratación de alimentos	31

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 3-1. Planta de frijol según hábito de crecimiento (a) voluble o de enredadera; (b) arbustivo. (Autor).....	15
Figura 3-2. Comportamiento de hidratación (DSC comportamiento cóncavo hacia abajo, Sigmoidal). Corte sagital y representación de absorción de agua en el grano de frijol (I, II, III superior). Corte longitudinal y representación de absorción de agua en el grano de frijol (I,II,III inferior).(Miano & Augusto 2018).....	22
Figura 3-3. Características de las ondas (Williams, 2012)	26
Figura 3-4. Tipos de transductores generadores de ultrasonidos. (Bhargava et al., 2021)	27
Figura 3-5. Esquema de los métodos de aplicación de ultrasonido. Mediante sonotrodo (a); mediante un baño de ultrasonidos (b).(Ampofo & Ngadi, 2022)	28
Figura 3-6. Ciclos de compresión y rarefacción inducidos por el ultrasonido (K. Das et al., 2022)	29
Figura 4-1. Variedades de frijol para el estudio (a) Frijol BIO101;(b) Frijol Nima-Calima. (Autor)	46
Figura 4-2. Posición de las semillas en el ultrasonido (a) vista superior del baño ultrasonido. Los puntos rojos indican la posición de los cuatro transductores en el interior del tanque; (b). Vista superior del baño ultrasonido. La canastilla de cedazo permite mantener el material a una distancia equidistante a los transductores. (Autor)	48
Figura 4-3. Representación del mejor modelo ajustado a los valores de hidratación obtenido (a) Modelo de Weibull para describir la cinética de hidratación del frijol BIO101; (b). Modelo de Weibull para describir la cinética de hidratación del frijol Nima-Calima... 53	53
Figura 4-4. Resultados exploratorios para la variedad BIO101.(a) (X_1 , °C) es la variable explorada. X_2 y X_3 son constantes (10 min y 96 W); (b). (X_2 , min) es la variable explorada. X_1 y X_3 , son constantes (35 °C y 96 W); (c). (X_3 , W) es la variable explorada. X_1 y X_2 , son constantes (35 °C y 10 min)	56
Figura 4-5. Resultados exploratorios para la variedad Nima-Calima.(a) (X_1 , °C) es la variable explorada. X_2 y X_3 son constantes (10 min y 96 W) (b) . (X_2 , min) es la variable explorada. X_1 y X_3 , son constantes (35 °C y 96 W) (c) . (X_3 , W) es la variable explorada. X_1 y X_2 , son constantes (35 °C y 10 min)	56
Figura 4-6. Efecto de la temperatura del medio de sonicación, tiempo de sonicación, y potencia de sonicación en la hidratación del frijol BIO101. (a) Superficie de respuesta temperatura medio sonicación-potencia de sonicación; (b) temperatura medio sonicación-tiempo de sonicación; (c), tiempo de sonicación- potencia de sonicación.....	62

Figura 4-7. Efecto de la temperatura del medio de sonicación, tiempo de sonicación, y potencia de sonicación en la hidratación del frijol Nima-Calima. (a) Superficie de respuesta temperatura medio sonicación-potencia de sonicación; (b) temperatura medio sonicación-tiempo de sonicación; (c) tiempo de sonicación- potencia de sonicación.	62
Figura 5-1. Esquema de las diferentes dimensiones tomadas para la semilla largo (length), ancho (width) y profundo (depth) (Ghafoor 2014).....	70
Figura 5-2. Esquema de las etapas de procesamiento y análisis de la muestra	72

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 2-1. Resumen de investigaciones relevantes en la aplicación del ultrasonido en los procesos de hidratación y cocción en los alimentos.	12
Tabla 4-1. Exploración de región de operabilidad para cada una de las variables independientes del estudio	49
Tabla 4-2. Codificación de factores para los puntos que componen el DCCR.....	50
Tabla 4-3. Valores paramétricos de cada modelo matemático de acuerdo con los datos de la HC para ambas variedades.	52
Tabla 4-4. Condiciones de operabilidad y modelo de mejor ajuste a los valores de t_{ha} obtenidos en la variedad BIO101.	54
Tabla 4-5. Condiciones de operabilidad y modelo de mejor ajuste a los valores de t_{ha} obtenidos en la variedad Nima-Calima	54
Tabla 4-6. Matriz del DCCR para la variedad BIO101 con su respectivo valor obtenido de tiempo de hidratación adecuado para cada tratamiento.	58
Tabla 4-7. Matriz del DCCR para la variedad Nima-Calima con su respectivo valor obtenido de tiempo de hidratación adecuado para cada tratamiento	58
Tabla 4-8. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo ajustado polinomial cuadrático en la variedad BIO101	59
Tabla 4-9. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo ajustado polinomial cuadrático en la variedad Nima-Calima	60
Tabla 4-10. Valores de t_{ha} obtenidos según sea el tratamiento de hidratación realizado.	63
Tabla 4-11. Valores paramétricos de cada modelo matemático de acuerdo con los datos de la HCPU en el óptimo global (temperatura sonicación 55 °C, tiempo de sonicación 15 min, potencia sonicación 120 W) para ambas variedades	63
Tabla 5-1. Evaluación característica de las semillas de frijol común (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	69
Tabla 5-2. Rango de curva de calibración, longitud de onda de detección y tiempo de retención para cada uno de los reactivos estándares de compuestos fenólicos	74
Tabla 5-3. Rango de curva de calibración y tiempo de retención para cada uno de los reactivos estándares de azúcares solubles	75
Tabla 5-4. Características morfológicas iniciales de las semillas	77
Tabla 5-5. Datos de tamaño de frijol, color y tiempo de cocción.	78
Tabla 5-6. Contenido de compuestos nutricionales sin procesar y procesado en las variedades estudiadas.....	81
Tabla 5-7. Contenido de compuestos antinutricionales sin procesar y procesado en las variedades estudiadas.....	82

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>msnm</i>	Metros sobre el nivel del mar
°C	Grados centígrados
<i>mm</i>	milimetro
μ g	microgramo
<i>mg</i>	miligramo
<i>g</i>	gramo
<i>kg</i>	kilogramo
<i>min</i>	minuto
m^2	metro cuadrado
<i>s</i>	segundo
<i>Hz</i>	Hertz
<i>J</i>	Julios
<i>K</i>	Kelvin
<i>W</i>	Watts
cm^2	centimetro cuadrado
<i>h</i>	hora
<i>rpm</i>	revoluciones por minuto
<i>mL</i>	mililitro
<i>L</i>	Litro
<i>KHz</i>	Kilohertz
<i>nm</i>	nanometro
<i>mM</i>	milimolar
<i>M</i>	molar

Introducción

El fríjol común (*Phaseolus vulgaris*) es el tercer cultivo de mayor producción en el mundo, después de la soya (*Glycine max L.*) y el maní (*Arachis hipogea L.*) (De Ron et al., 2015). En el año 2020, la producción mundial de fríjol alcanzó una cifra de 28 millones de toneladas, siendo India, Myanmar y Brasil los países con mayor producción con valores de 5.5, 3.1 y 3.0 millones de toneladas respectivamente (FAO, 2021). En Colombia, en el año 2019, la producción de fríjol fue de 114 mil toneladas, siendo Huila, Santander, Antioquia y Nariño los departamentos con mayor producción (Minagricultura, 2020).

El fríjol, se destaca como un gran alimento nutricional por su alto contenido en proteína, carbohidratos y fibra dietaria, como también una buena fuente de minerales, especialmente de hierro y de zinc (Gomes Basso Los et al., 2018). Por lo general, los procesos de preparación de los alimentos se realiza para facilitar la masticación y la deglución de estos, reducir el riesgo de enfermedades e intoxicación por posibles bacterias o compuestos que podría contener el alimento en su estado natural (crudo), así como también mejorar las cualidades de aceptabilidad en el consumidor (Nieto, 2014). Una de las formas más habituales de procesar el fríjol es mediante la cocción tradicional, en donde el fríjol se pone en exceso de agua hirviendo (100°C) en una olla, durante un tiempo determinado hasta que el alimento alcance una textura granular suave (Drulyte & Orlie, 2019). Sin embargo, el proceso de preparación puede presentar inconvenientes si el tiempo requerido para obtener una composición ideal es prolongado, implicando una tarea compleja, ya que este proceso involucra grandes cantidades de calor, lo que generaría un impacto negativo debido al el consumo excesivo de energía térmica (Wood, 2017).

Por lo general, uno de los métodos de preprocesamiento utilizados para el proceso de preparación del fríjol mediante cocción, es el remojo o la hidratación. Hidratar el fríjol antes del proceso de cocción reduce el t_c , debido a que la hidratación hace que las moléculas de agua se dispersen sobre la fracción proteica y los gránulos de almidón, implicando la desnaturalización y gelatinización de este, suavizando la textura del fríjol (Abbas & Ahmad,

2018). Algunos parámetros importantes en la hidratación son: la proporción frijol:agua, la temperatura del agua de hidratación y el tiempo de hidratación, los cuales pueden diferir según la variedad de frijol, con proporciones que van desde 1:1 a 1:5, agua a temperatura ambiente o agua a temperatura mayor a la temperatura ambiente y tiempo de hidratación entre 12 a 16 horas (Wood, 2017). Cualquiera que sea las condiciones del proceso de hidratación, se considera una hidratación adecuada de las semillas de frijol, cuando estas alcanzan un contenido de humedad mayor al 53% (Howard et al., 2018). Sin embargo, al igual que el t_c suele ser un parámetro de calidad de frijol, el t_{ha} también lo es. Comúnmente, los procesos de hidratación del frijol puede demorar varias horas, lo que puede convertirse en un problema para el consumidor debido a los procesos de preparación extensos, no atendiendo a sus necesidades de consumo a tiempo (Belmiro et al., 2018). Además, los tiempos prolongados de hidratación, pueden aumentar el riesgo de una contaminación biológica en el alimento (Lee et al., 2023). Por ello, tanto en el procesamiento industrial, como en la procesamiento doméstico, la hidratación es una etapa determinante del proceso de preparación del frijol, ya que el tiempo y la tasa de hidratación puede tener un impacto directo a nivel productivo, económico y social (Schoeninger et al., 2017).

El ultrasonido son ondas mecánicas cuyas frecuencias están por encima de los 20 MHz y no pueden ser percibidas por el oído humano (Gallo et al., 2018). Se ha reportado que la aplicación del ultrasonido acelera el proceso de hidratación en cereales y leguminosas, como en el trigo (*Triticum spp.*) (Guimarães et al., 2020), sorgo (*Sorghum bicolor*) (Patero & Augusto, 2015), maíz (*Zea maíz*) (Miano et al., 2017), garbanzos (*Cicer erietinum*) (Ranjbari et al., 2013), guandú (*Cajanus cajan*) (Vásquez et al., 2021), frijol común (*Phaseolus vulgaris*) (Ulloa et al., 2015), que debido al efecto de cavitación acústica provocadas por las ondas de sonido que viajan a través del agua, logra mejorar la transferencia de masa (Miano & Augusto, 2018a). Otras investigaciones han determinado que la aplicación del ultrasonido no sólo acorta el tiempo en el proceso de hidratación, sino que también puede reducir el tiempo en el proceso de cocción (Ulloa et al., 2015). Sin embargo, el uso exagerado del ultrasonido, podría comprometer algunas propiedades nutricionales del alimento como la degradación de compuestos fenólicos, vitaminas, pérdida del contenido de antocianinas y modificaciones físicas no deseadas como la pérdida acelerada del color y daños en la testa del grano (Taha et al., 2023)

Conociendo las propiedades del ultrasonido y su aplicación en los procesos de hidratación, en combinación con las técnicas convencionales de hidratación (remojo a temperatura

ambiente y remojo a temperaturas mayores que la temperatura ambiente), el objetivo de este proyecto fue estudiar el efecto del ultrasonido en la hidratación y la calidad nutricional en la cocción del frijol común (*Phaseolus vulgaris*). Para ello, se realizaron ensayos de hidratación a diferentes temperaturas del medio de sonicación, tiempos de sonicación y potencias de sonicación. Posteriormente, se obtuvieron los modelos matemáticos que mejor describieron la cinética de hidratación para cada ensayo realizado y se encontró las condiciones experimentales en donde de hidratación fue óptima mediante la metodología de superficie de respuesta. Además, se realizaron diferentes análisis para determinar la composición nutricional del frijol antes y después del proceso de preparación a saber: análisis de materia seca, contenido de micronutrientes (hierro y zinc) contenido de macronutrientes (proteína y azúcares solubles), contenido de metabolitos secundarios (compuestos fenólicos y ácido fítico).

1. Planteamiento del problema

1.1 Definición del problema

El fríjol común (*Phaseolus vulgaris*) es uno de los cultivos alimentarios de gran importancia a nivel mundial por su aporte nutricional y su impacto económico (Hayat et al., 2014). Además, el cultivo de fríjol ayuda a reducir los gases de efecto invernadero mediante la captación de dióxido de carbono de la atmósfera, mejora la salud del suelo y tiene bajos requerimientos hídricos (Augustin & Cole, 2022). Sin embargo, el consumo de este alimento se ve socavado en el grado de aceptabilidad por parte del consumidor, principalmente, por los largos procesos en la preparación, haciendo de su preparación incompatible con el estilo de vida acelerado de la sociedad actual (Li et al., 2020). La preparación del fríjol de manera habitual, requiere un periodo prolongado de cocción, obligando al consumidor un uso excesivo de energía térmica y una alta demanda de tiempo. Por ello, hidratar las semillas de fríjol como etapa previa al proceso de cocción, reduce el tiempo de cocción para que estas alcancen una textura suave (Sánchez-Arteaga et al., 2015).

Actualmente, algunas de las técnicas más habituales de hidratación se basan en el remojo de las semillas de fríjol a temperatura ambiente, en donde los periodos de hidratación suelen alcanzar hasta 16 horas para asegurar una hidratación adecuada (Pereira et al., 2016). Sin embargo, la exposición de las semillas durante largos tiempos en remojo, pueden llevar a la germinación de estas, que a pesar de ser un proceso ampliamente utilizado en las legumbres para aumentar su palatabilidad y valor nutricional, podría no ser una característica deseada por el consumidor (Tajoddin et al., 2014). Por otro lado, el contacto prolongado de las semillas de fríjol con el agua de remojo, también pueden favorecer la proliferación microbiana en el alimento como bacterias, levaduras y hongos, por lo que algunos autores expresan una baja favorabilidad de preparación de un fríjol en particular que demande un t_{ha} excesivo (Zamindar et al., 2013). Otra de las técnicas empleadas en la hidratación, es el remojo de las semillas a temperaturas ligeramente mayores de la temperatura ambiente, lo cual mejora la tasa de absorción de agua, acortando el t_{ha} (Li et al., 2020). Sin embargo, es necesario encontrar las condiciones óptimas de temperatura de remojo que permita minimizar el t_{ha} sin exagerar en el consumo de energía térmica.

La implementación de tecnologías emergentes como el ultrasonido ha permitido mejorar los procesos de conservación y preparación de los alimentos, cuyas aplicaciones son notorias tanto a nivel doméstico, como industrial, viéndose reflejadas en términos de vida útil del alimento, tiempo de procesamiento, consumo de recursos económicos, medio ambiente, entre otros.

El uso del ultrasonido se ha convertido en una tecnología importante en el ámbito alimentario. Algunos autores han estudiado el ultrasonido como técnica de preservación en alimentos de origen animal (Piñon et al., 2019) y vegetal. También, el ultrasonido se ha empleado en procesos de operación unitaria de transferencia de masa como por ejemplo, la hidratación en cereales y legumbres, en donde la aplicación del ultrasonido acelera el proceso de absorción de agua y la lixiviación de solutos en las semillas (Miano & Augusto, 2018a). Sin embargo, aún faltan estudios experimentales sobre la hidratación del frijol mediante la aplicación del ultrasonido a diferentes potencias de sonicación, en combinación con la hidratación convencional.

El uso del ultrasonido y sus propiedades, combinado con la HC, puede ser una implementación idónea para acortar el t_{ha} , así como también reducir el t_c , mejorando la calidad del procesamiento tanto a nivel doméstico, como industrial. Por lo tanto, con el propósito de optimizar el proceso de hidratación, es posible mejorar las etapas de procesamiento del frijol, sin que estas comprometan la calidad nutricional del alimento.

1.2 Pregunta problema

¿Qué tratamiento de hidratación convencional con previa sonicación, contribuye a la reducción del tiempo de hidratación adecuado del frijol común (*Phaseolus vulgaris*), sin afectar la calidad nutricional del mismo?

1.3 Hipótesis

A partir de la pregunta de investigación planteada, se exponen las siguientes hipótesis:

Capítulo: Optimización del proceso de hidratación por ultrasonido

H₀: El tratamiento de hidratación convencional con previa sonicación no reduce el tiempo de hidratación adecuado en el fríjol común (*Phaseolus vulgaris*).

H₁: El tratamiento de hidratación convencional con previa sonicación reduce el tiempo de hidratación adecuado en el fríjol común (*Phaseolus vulgaris*).

Capítulo: Evaluación de los cambios del contenido nutricional en la cocción del fríjol común

H₀: El tratamiento de hidratación convencional con previa sonicación no afecta el contenido nutricional en el fríjol común (*Phaseolus vulgaris*).

H₁: El tratamiento de hidratación convencional con previa sonicación afecta el contenido nutricional en el fríjol común (*Phaseolus vulgaris*).

1.4 Justificación

La hidratación de las legumbres es una de las operaciones iniciales como pretratamiento en la preparación de estos alimentos, y de esta etapa depende el éxito de las etapas posteriores del proceso de preparación (Perera et al., 2023). De manera que es necesario recurrir a la aplicación de tecnologías emergentes como parte de los procesos de hidratación convencional para hacer de esta operación mucho más eficiente. Una de las tecnologías emergentes que han sido de mayor objeto de estudio en las legumbres, es el ultrasonido (Vásquez et al., 2021; Miano, Pereira, et al., 2016; Ranjbari et al., 2013).

El ultrasonido es una de las tecnologías emergentes propuesta como aplicación en la agroindustria y ciencia de los alimentos para mejorar la cinética de hidratación de las legumbres, ya que además de reducir el tiempo en que toma el grano en alcanzar una hidratación adecuada, también puede acelerar el proceso de cocción de estos (Wainaina et al., 2021). De modo que, es importante determinar la exposición adecuada de tiempo y cantidad de energía aplicada de ultrasonido para hidratar cualquier legumbre, ya que las características estructurales y composición química entre ellas difieren entre sí. De hecho, para el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), la velocidad y capacidad de absorción difiere entre cada variedad de semilla (López et al., 2017).

Para determinar las condiciones adecuadas de sonicación en donde el proceso de hidratación es óptimo, es primordial fijar un objetivo de orden cuantitativo, el cual está ligado a un valor porcentual de hidratación óptimo o adecuado. Según Howard et al. (2018), en el caso del frijol común (*Phaseolus vulgaris*), se considera una hidratación adecuada cuando el porcentaje de humedad de las semillas de frijol alcanzan un valor entre el 53-57%. Para lograr determinar entonces, el tiempo de hidratación adecuado que toma un tratamiento en específico para que las semillas de frijol alcancen dicho valor porcentual de hidratación, es necesario aplicar modelos matemáticos, los cuales logren representar la tasa de absorción de agua en las semillas de frijol con respecto al tiempo de hidratación (Ghafoor et al., 2014).

La implementación de tecnologías emergentes como el ultrasonido en los procesos de hidratación convencional en el frijol común (*Phaseolus vulgaris*) puede mejorar la eficiencia del proceso de hidratación y, por ende, el procesamiento del alimento en general, viéndose reflejado en el aumento de la aceptación de este alimento por el consumidor y haciendo más frecuente su consumo. Unido a esto, está el aumento de la productividad y

competitividad en el procesamiento del frijol común (*Phaseolus vulgaris*) en el sector agroindustrial.

En este orden de ideas y teniendo en cuenta la aplicación del ultrasonido como implementación en los procesos de hidratación convencional en las legumbres, es de necesidad estudiar los factores que influyen en la cinética de hidratación y sus efectos en cada variedad de frijol de interés. Además, es importante determinar en qué grado afectan los diferentes tratamientos de hidratación sobre el t_c y sobre la calidad nutricional. Por lo tanto, se considera como variables de operación el tiempo de exposición del frijol a la sonicación, la cantidad de energía o potencia de sonicación y la temperatura del medio de sonicación, factores que pueden influir en el tratamiento de hidratación aplicado.

Considerando que el desarrollo de este trabajo de investigación es experimental con obtención de datos cuantitativos, es posible determinar las condiciones de operación del ultrasonido, en donde su aplicación sea óptima en la implementación con el proceso de hidratación convencional. Esto permitiría mejorar las etapas del procesamiento del frijol común (*Phaseolus vulgaris*) disponiendo de menor tiempo en su preparación e incentivando al consumo de este alimento, teniendo un impacto positivo en las poblaciones consumidoras debido al aporte nutricional que contiene este alimento.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del ultrasonido sobre la hidratación y calidad nutricional en la cocción del frijol común (*Phaseolus vulgaris*)

1.5.2 Objetivos específicos

Optimizar el proceso de hidratación convencional del frijol común (*Phaseolus vulgaris*), mediante la aplicación de un pretratamiento con ultrasonido.

Determinar los cambios en el contenido nutricional en la preparación del frijol común (*Phaseolus vulgaris*) mediante el proceso cocción, con respecto a los tratamientos de hidratación convencional e hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido.

2. Estado del arte

El remojo o hidratación es una operación principal en el procesamiento de las legumbres que permite mejorar la textura de las semillas, reducir el t_c , y más importante aún, reducir el contenido de antinutrientes (G. Das et al., 2022). El remojo de las semillas de leguminosa en agua a temperatura ambiente, seguido de la cocción en agua en ebullición, es una de las técnicas más comunes para procesar este alimento, ya que la simplicidad de estas dos operaciones hace que sea fácilmente accesible (Costa et al., 2018). No obstante, hidratar las semillas de manera convencional, suelen ser una operación poco eficiente, ya que alcanzar una hidratación adecuada en las semillas, conlleva a tiempos de remojo prolongados, generando el riesgo de contaminación microbiana. Por consiguiente, se han empleado técnicas alternativas de hidratación para mejorar el t_{ha} en las legumbres. El empleo de la tecnología del ultrasonido ha sido una de las aplicaciones que se han implementado para mejorar la cinética de hidratación en las legumbres.

Ghafoor et al. (2014), analizaron el efecto del ultrasonido en la hidratación del frijol blanco “blanquillo” (*Phaseolus vulgaris*). El procedimiento se realizó pesando en un vaso de precipitado 20 g de semilla y agregándole 100 g de agua a 16 °C. Los datos de absorción de agua en las semillas se obtuvieron en intervalos regulares de tiempo, mediante la ganancia de peso en la semilla. Para el procedimiento control, las semillas no recibieron sonicación, mientras que, para el procedimiento con ultrasonido, el vaso de precipitado junto con su contenido fue llevado a un baño de sonicación con operación continua de 47 KHz y 750 W. Se evaluaron diferentes modelos matemáticos con la finalidad de encontrar una ecuación que mejor describiera la curva de la cinética de absorción a partir de los datos recopilados del contenido de agua en las semillas en cada intervalo de tiempo de remojo. Los autores compararon las curvas obtenidas de las cinéticas de hidratación tanto del tratamiento control, como del tratamiento con sonicación y encontraron que el uso del ultrasonido mejoró el coeficiente de difusión efectivo obteniendo valores de 1.36×10^{-10} m²/s y 2.19×10^{-10} m²/s sin ultrasonido y con ultrasonido respectivamente, concluyendo

que la aplicación del ultrasonido aumenta la velocidad de hidratación en el frijol blanco y reduce el tiempo de remojo.

Ulloa et al. (2015), estudiaron el efecto del ultrasonido en las cinéticas de hidratación y en los t_c en seis variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris*). El procedimiento de hidratación constituyó en someter a hidratación las semillas a diferentes tiempos de sonicación (10, 20 y 30 min) en un baño de ultrasonido a 40 KHz y 130 W con temperatura controlada a 30 °C. A partir de los resultados obtenidos, se observó que el tratamiento de sonicación por 30 min, fue el tratamiento que mayor efecto tuvo en la cinética de hidratación para las seis variedades en estudio, con un porcentaje de disminución del t_{ha} en un rango de 17.6-58.8% con respecto a los valores de t_{ha} obtenidos ensayos control (sin ultrasonido). El efecto del ultrasonido también redujo el t_c de las variedades de frijol en estudio, en donde se logró se presentó una reducción porcentual entre el 5.4-43% de del t_c para las variedades de frijol estudiadas. En conclusión, los autores afirman que la aplicación del ultrasonido mejora el t_{ha} , como también el t_c . Sin embargo, hacen importancia en que el efecto del ultrasonido en la cinética de hidratación, y en especial en los t_c están más bien ligados a la variedad de frijol a estudiar.

López et al. (2017), examinaron el efecto de la exposición de ultrasonido a diferentes potencias sobre seis variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris*) con respecto a la cinética de hidratación. El proceso de hidratación consistió en pesar 5 g de semilla en un vaso de precipitado y remojarla con 50 g de agua. Los experimentos se realizaron para cada variedad de frijol en estudio sonicados a diferentes potencias (5, 12 y 19 W) mediante un sonotrodo conectado a un procesador de ultrasonidos. Los datos obtenidos producto de la investigación reportaron que el tratamiento con sonicación a 19 W, presentó una reducción en el tiempo de remojo entre el 52.6-77.2%, mientras que el coeficiente de difusión efectivo incrementó 2.25 veces en comparación al tratamiento control, siendo este tratamiento el que mayor efecto presentó en la cinética de hidratación en las variedades estudiadas. En conclusión, los autores reportan que la potencia de las ondas de ultrasonido tiene un efecto positivo en la hidratación del frijol común (*Phaseolus vulgaris*), pero además hacen hincapié, en que, a mayor potencia de ultrasonido, existe mayor riesgo de rompimiento de la testa del frijol a causa de las implosiones abruptas producto del fenómeno de cavitación.

También se encontró que Miano, Sabadoti & Augusto Duarte (2018), quienes en su investigación desarrollada sobre los procesos de hidratación en legumbres, analizaron el

efecto de la temperatura y del ultrasonido en las cinéticas de hidratación y su impacto en la cocción. Para este estudio, se empleó frijol blanco “blanquillo” (*Phaseolus vulgaris*) como matriz alimentaria, a la cual se le realizaron ocho tipos de tratamientos clasificados en dos grupos, cuatro tratamientos a temperaturas de remojo diferentes (25, 35, 45 y 55 °C), y cuatro tratamientos a las mismas temperaturas de remojo ya mencionadas, aplicando ultrasonido (40 KHz, 28 W/L). En esta investigación se encontró que ambas tecnologías mejoraron los t_{ha} cuando son aplicadas individualmente. Sin embargo, cuando estas tecnologías son aplicadas en combinación, a temperaturas elevadas el efecto del ultrasonido tiende a ser mínimo o nulo sobre la tasa de hidratación. En conclusión, ambas tecnologías tienen efecto sobre la hidratación del frijol cuando son aplicadas por separado y pueden ser aplicadas en conjunto, preferiblemente a temperaturas que levemente elevadas.

A continuación, se presenta un cuadro resumen con otros estudios que también han sido relevantes en la aplicación de la tecnología del ultrasonido en los procesos de hidratación y cocción otros alimentos similares (Tabla 2-1), en donde se describe la matriz biológica, las condiciones de tratamiento de hidratación, los resultados/conclusiones y los autores del estudio de investigación.

Tabla 2-1. Resumen de investigaciones relevantes en la aplicación del ultrasonido en los procesos de hidratación y cocción en los alimentos.

Matriz alimentaria	Condiciones del tratamiento de hidratación	Efectos/conclusiones	Autores
Garbanzos (<i>Cicer arietinum</i>)	87,92 y 97°C; 25 KHz, 100-300 W	Aumento de la tasa de absorción de agua conforme aumentó el tiempo de remojo, la temperatura y la potencia de ultrasonido	(Yildirim & Öner, 2015)
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	25, 53°C; 40 KHz, 0.026 W/mL	El combinar ambas tecnologías (ultrasonido y calentamiento) tienen un efecto insignificante. El efecto de hidratación fue mayor cuando se aplicaron las tecnologías por separado.	(Patero & Augusto, 2015)
Sorgo y melón	40KHz, 28W/L	Los efectos del ultrasonido son más pronunciados en los alimentos con mayor actividad de agua (melón), con respecto a los alimentos secos (sorgo). El efecto del ultrasonido mejora la transferencia de masa en ambos tipos de alimentos.	(Miano, Ibarz, et al., 2016a)

(Continuación)

Matriz alimentaria	Condiciones del tratamiento de hidratación	Efectos/conclusiones	Autores
Trigo (<i>Triticum spp.</i>)	15, 20, 25°C; 20KHz, 300-1500W	Se redujo hasta un 40% en el tiempo de hidratación con la aplicación de la tecnología del ultrasonido por incremento de la potencia de sonicación, y hasta un 70% combinado con el aumento de la temperatura.	(Guimarães et al., 2020)
guandú (<i>Cajanus cajan</i>)	0.1, 1.5, y 2 % NaHCO ₃ , 27°C; 40 KHz, 17, 43 W/L	El ultrasonido aceleró la cinética de hidratación, pero no tuvo efecto en la cinética de cocción. El empleo de la solución diluida de NaHCO ₃ , retrasó la cinética hidratación y aceleró la cinética de cocción. El uso de ambas sinérgico del ultrasonido a 17 W/L y NaHCO ₃ 1%, mejoró la cinética de hidratación y de cocción.	(Vásquez et al., 2021)

3. Marco teórico

La clasificación taxonómica del frijol común proviene de la familia *Leguminosae*, género *Phaseolus*, y de la especie *vulgaris* (Debouck & Hidalgo, 1985). Los primeros orígenes de este alimento datan de aproximadamente hace 7000 años, siendo el frijol mesoamericano y el frijol andino las dos diversidades genéticas domesticadas (Beebe et al., 2001). Esta domesticación tuvo lugar en las regiones que hoy comprenden México y Perú respectivamente. Este alimento presenta una mayor variación en el hábito de crecimiento, en las características morfológicas de la semilla (forma, tamaño y color) y en el tiempo de maduración, favoreciéndose que pueda darse en diferentes continentes como América, África, Asia y parte de Europa. Existen más de 35 especies, sin embargo, comercialmente las más conocidas son *Phaseolus vulgaris*, *Phaseolus lunatus*, *Phaseolus coccineus* y *Phaseolus acutifolius*. El cultivo de frijol se destaca principalmente en la región central y sur de América, ya que este alimento no solo hace parte de la dieta de la población urbana y rural, sino también de la cultura y tradición culinaria. Sin embargo, en algunas regiones de África Oriental, el frijol es cultivado principalmente para solventar las condiciones de inseguridad alimentaria (Suárez-Martínez et al., 2016).

3.1 Condiciones climatológicas y ciclo fenológico del cultivo de frijol

La planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) se adapta a diferentes pisos térmicos desde los 900 hasta los 2900 msnm y temperaturas entre 15-27 °C, humedades relativas entre 60-75% y requerimientos hídricos de 500 mm/año, con rangos de pH entre 5.5-6.5, cuyo desarrollo más adecuado se da en suelos franco-limosos y franco-arcillosos, característica importante para que la planta tenga un buen desarrollo radicular (Rios & Quiroz, 2002).

Son cinco etapas relacionadas al desarrollo vegetativo y cinco etapas relacionadas al desarrollo reproductivo y se requiere entre 62 a 77 días después de la siembra para llegar a su estado de madurez (Lépiz-Ildefonso et al., 2018). Según su hábito de crecimiento, la

planta puede clasificarse como arbustiva, la cual tiene tendencia a crecimiento sobre el suelo, y voluble, la cual tiene tendencia al crecimiento con características de una planta enredadera. La planta de frijol arbustivo presenta un tiempo de maduración más corto, mientras que la planta de frijol voluble, su maduración es realizada por etapas (Rios & Quiroz, 2002). El 65% de frijol producido en Colombia corresponde a frijol voluble, el otro 35% restante corresponde al tipo arbustivo. Las variedades más conocidas en el país son froilán, cargamanto blanco, cargamanto rojo, calima y bola roja (Jara & Giraldo, 2016).

Figura 3-1. Planta de frijol según hábito de crecimiento (a) voluble o de enredadera; (b) arbustivo. (Autor)



3.2 Composición nutricional del frijol común

Por su composición nutricional, principalmente en proteínas y carbohidratos, el frijol es considerado como la carne del “hombre pobre”. Por ello, este alimento es de gran importancia en los países del tercer mundo, donde el déficit proteico-calórico es un problema de salud pública (Hayat et al., 2014). La introducción del frijol a la dieta humana disminuye el riesgo de enfermedades crónicas, incluidas las enfermedades cardiovasculares, el cáncer y la diabetes tipo 2 (Doma et al., 2019).

3.2.1 Micronutrientes

Los micronutrientes son elementos esenciales, ya que estos no pueden ser sintetizados por el organismo a partir de otras sustancias cuya única forma en que puedan ser proporcionados es mediante la dieta alimentaria (Shergill-Bonner, 2017). Los micronutrientes son importantes en el crecimiento, desarrollo, metabolismo, regeneración, mantenimiento del cuerpo y su déficit puede acarrear daños irreversibles en la salud (Cardoso et al., 2019). Los micronutrientes comprenden dos grupos importantes: los minerales y las vitaminas. El frijol común (*Phaseolus vulgaris*) es una fuente rica en minerales, principalmente de hierro ($55 \pm 8.3 \mu\text{g}/\text{mg}$), zinc ($35 \pm 5.0 \mu\text{g}/\text{mg}$) y manganeso ($15 \pm 4.4 \mu\text{g}/\text{mg}$) (Beebe et al., 2000), que junto con el trigo y el maíz, es considerado uno de los cultivos estratégicos para afrontar la problemática del déficit de micronutrientes en la población (Ortiz-Monasterio et al., 2007). La amplia variabilidad genética en el frijol común, ha hecho posible mediante fitomejoramiento aumentar las concentraciones de hierro y zinc a través de procesos tradicionales o genéticos (Petry et al., 2015). Además, los minerales están implicados en diversas funciones especiales que comprenden desde el desarrollo de una estructura ósea fuerte, hasta la transmisión de los impulsos nerviosos. Algunos minerales como el calcio, son importantes en la composición estructural de los huesos y dientes, mientras que otros no hacen parte de una macroestructura específica del cuerpo, pero son de vital importancia para el normal funcionamiento de las enzimas y otras moléculas especiales (Gharibzahedi & Jafari, 2017). El déficit de estos minerales puede acarrear diversas enfermedades. Por ejemplo, el déficit de hierro conlleva a un nivel bajo de hemoglobina (según edad y género) que puede generar afecciones como la anemia ferropénica (Allali et al., 2017). De modo similar, el déficit de zinc está estrechamente relacionado con trastornos de crecimiento y desarrollo en los niños, así como también influye en el debilitamiento del sistema inmunológico (Krebs et al., 2014). Por otro lado, las

vitaminas desempeñan diferentes funciones actuando como intermediarios en el metabolismo, especialmente en órganos específicos (Campbell, 2017). Por ejemplo, en el frijol se puede encontrar vitaminas del complejo B como la tiamina (vitamina B1), riboflavina (vitamina B2), niacina (vitamina B3), ácido pantoténico (vitamina B5), colina (vitamina B7) y ácido fólico (vitamina B9), tocoferol (vitamina E), entre otros (Suárez-Martínez et al., 2016). Igualmente, la deficiencia de las vitaminas del complejo B están relacionadas con la enfermedad del beriberi, pelagra, malformaciones y enfermedades congénitas en el feto (Argyridis, 2019).

3.2.2 Macronutrientes

El frijol proporciona una cantidad considerable de macronutrientes. Los hidratos de carbono componen entre el 50 y 60% del peso del frijol, siendo el almidón el carbohidrato con mayor presencia de contenido (Ovando-Martínez et al., 2011). El almidón, es una macromolécula cuya estructura se compone de un polímero lineal (amilosa) con enlaces α 1-4 entre unidades de D-glucosa y un polímero ramificado (amilopectina), igualmente con unidades de D-glucosa con enlaces α 1-4 y α 1-6 (Liu et al., 2017). Así mismo, el almidón es la fuente principal de energía calórica en la gran mayoría de legumbres y cereales, considerándose este como el principal sustrato metabólico del cuerpo (Ashwar, 2021). Además, el frijol se considera uno de los alimentos con bajo índice glucémico, ya que el almidón del frijol es digerido lentamente, haciendo atenuar la respuesta posprandial a la insulina (Feregrino-Pérez et al., 2008).

Otros carbohidratos más sencillos como los monosacáridos, disacáridos y oligosacáridos, en especial la estaquiosa y la sacarosa, representan la gran mayoría del contenido total de azúcares solubles. Sin embargo, el contenido de estaquiosa, rafinosa y verbascosa son algunos de los oligosacáridos que han sido relacionados con problemas de flatulencia por el consumo del frijol (Kotha et al., 2020). El ser humano, al igual que los animales monogástricos, carecen de la enzima α -galactosidasa, la cual es la encargada de hidrolizar estos sacáridos en unidades de α -D-galactosa y sacarosa. Debido a esto, los compuestos pasan al intestino grueso, donde ocurre el proceso de fermentación causando la generación de flatos (Singh et al., 2017).

El frijol también es una fuente rica en proteína. Se calcula que una porción de 90 g de frijol cocido, puede llegar a proporcionar hasta 8 g de proteína, equivalente al 15% de la ingesta

recomendada de proteína para un individuo de 70 Kg (Suárez-Martínez et al., 2016). Además, contiene aminoácidos esenciales como la lisina y treonina (Boye et al., 2010). Sin embargo, este alimento es deficiente en otros aminoácidos como la cisteína y metionina, considerados como parámetros nutricionales en la evaluación de la calidad proteica del alimento (FAO / WHO Expert Consultation, 2011).

En cuanto al déficit por carbohidratos y proteínas, este conlleva a la desnutrición calórico-proteica, en donde el individuo genera pérdida de la masa muscular y depleción de grasa corporal, presentando un peso muy por debajo del peso ideal. Por ello, el frijol se ha convertido en uno de los alimentos de gran importancia para combatir el problema de malnutrición por déficit de estos componentes nutricionales (Batista et al., 2011).

3.2.3 Compuestos antinutricionales

El frijol contiene diferentes metabolitos secundarios como el ácido fítico, inhibidores de proteasas, lectinas, taninos, saponinas y algunos compuestos fenólicos, los cuales interfieren en la absorción de micronutrientes.

El ácido fítico es la fuente principal de almacenamiento de fósforo y representa el 1-5% de la composición en las leguminosas, encontrando en el frijol un contenido entre 6.1-23.8 mg/g (Gupta et al., 2013). Además, el ácido fítico representa alrededor del 85% del total del contenido de fósforo en cereales y leguminosas, y se han vinculado propiedades beneficiosas como posible protección contra varios tipos de cáncer debido a su capacidad antioxidantes (Zehring et al., 2022). Sin embargo, este compuesto también ha sido relacionado con la inhibición de la absorción de minerales como el hierro, zinc, calcio y magnesio debido a su capacidad de ligar estos micronutrientes (Sinkovič et al., 2023). La formación ligando-metal entre el fitato y el micronutriente, hace que el complejo formado sea muy estable, impidiendo que este mineral pueda ser absorbido a través de la membrana intestinal (Orozco et al., 2020).

Los inhibidores de la enzima tripsina y de la enzima quimotripsina, también son considerados compuestos antinutricionales. La tripsina y la quimotripsina son proteasas secretadas por el páncreas durante la digestión, cuya función es romper los enlaces peptídicos de las proteínas. Los inhibidores actúan restringiendo la actividad enzimática de las proteasas impidiendo la digestión de las proteínas y disminuyendo la biodisponibilidad de aminoácidos (Gomes Basso Los et al., 2018). Los inhibidores de estas enzimas son

comunes en el frijol y la soja y reciben el nombre de inhibidores de Kunitz y Bowman-Birk (Reynoso-Camacho & Ramoz-Gomez, 2006).

Las lectinas, son un tipo de proteínas del grupo fitohemaglutininas (PHA, PHA-E y PHA-L) y tienen la capacidad de unirse al epitelio intestinal y se relaciona con la alteración del borde del cepillo, reduciendo la viabilidad de las células del epitelio intestinal, causando un daño en la pared del mismo, afectando la biodisponibilidad de micronutrientes importantes como el hierro y el zinc (Giuberti et al., 2019)

Otro conjunto de compuestos notoriamente presentes en las semillas de frijol y que han sido considerados como los principales antioxidantes en la dieta, son los compuestos fenólicos. El frijol tiene un contenido aproximado de 50 mg equivalentes de ácido gálico/g, cuyo mayor contenido está distribuido en la testa de la semilla y pueden llegar a representar hasta el 11% del peso total del grano (Yang et al., 2018). Algunos flavonoides como la catequina y la quercertina son encargados de neutralizar los radicales libres como el superóxido (O_2^{\cdot}), el hidroxilo (OH^{\cdot}), el peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y el ácido hipocloroso (HClO). Además, la quercertina junto con la miricetina y el kaempferol, son los flavonoides que de mayor influencia en las reacciones de neutralización de radicales libres (Quiñones et al., 2012). A pesar de que los compuestos fenólicos presentan propiedades antioxidantes, también pueden tener efectos antinutricionales ya que también pueden interactuar con algunos elementos de la dieta cuando su ingestión es muy elevada y crónica. Sin embargo, los compuestos fenólicos pueden ser tóxicos si alcanzan entre el 1-5% del total de la dieta, valores poco posibles debido a la baja absorción que tienen estos compuestos y un rápido metabolismo, siendo habitual consumir entre 25-1000mg por día (Creus, 2004). Además, se ha encontrado que la absorción de los compuestos fenólicos es pequeña y que entre 7-25% del contenido total de los compuestos fenólicos ingeridos son encontrados en el plasma y la orina. No obstante, en el plasma humano se ha cuantificado concentraciones de $1\mu M$ y menores, luego de la ingesta del alimento (Pérez-Perez et al., 2019). Algunos autores han relacionado que los compuestos fenólicos del frijol inhiben la absorción del hierro, sin embargo reconocen que hace falta realizar una investigación más exhaustiva en relación a un compuesto en específico (Petry et al., 2010). Algunos ácidos fenólicos como el 3,4-dihidroxibenzoico, y flavonoides como la catequina, kaempferol y kaempferol 3-glucósido, han demostrado que su presencia en el frijol, mejora la absorción del hierro. Por otro lado, la miricetina, miricetina 3-glucósido, quercertina y

quercertina 3-glucósido suelen actuar como inhibidores de este mineral cuando las concentraciones son mayores $143 \pm 7.2 \mu\text{M}$ (Hart et al., 2015).

3.3 Procesos de preparación domésticos e industriales del fríjol común

Los procesos de preparación de los alimentos también han sido objeto de estudios en las últimas décadas con la finalidad de mantener en lo mayor posible el aporte nutricional, conservar o mejorar la aceptabilidad sensorial por parte del consumidor y disminuir el tiempo del proceso de preparación minimizando gastos económicos y energéticos. Se sabe que el fríjol común sin procesar contiene diversos compuestos antinutricionales, los cuales deben eliminarse o reducirse mediante alguna etapa específica durante el proceso de preparación, para así mejorar la digestibilidad y el valor nutritivo (Satya et al., 2010). La cocción en agua es una de las operaciones del proceso de preparación más habituales del fríjol, especialmente en regiones de África y Latinoamérica (Nyau, 2014). Sin embargo, previo a la etapa de cocción, está la etapa de hidratación, la cual es el paso inicial y quizás el más importante en el proceso de preparación, que consiste en dejar las semillas de fríjol en remojo con la finalidad de aumentar mediante absorción, el contenido interno de agua, preparándolas así para obtener una cocción más óptima (Yildirim et al., 2011). La cocción en agua es tal vez uno de los procesos más antiguos y comunes de preparación de este alimento y consiste en remojar o hidratar en agua las semillas de fríjol durante un periodo prolongado, seguido de un tiempo determinado en ebullición en agua. Las etapas de hidratación y cocción no solo juegan un rol fundamental en el proceso de preparación del fríjol, sino que también son etapas que determinan la calidad nutricional y sensorial de este. Los cambios ocasionados en el alimento debido al proceso de preparación pueden afectar las propiedades sensoriales como el sabor, la textura, la apariencia y la calidad nutricional (Fabbri & Crosby, 2016). Por ejemplo, durante el proceso de cocción el fríjol presenta cambios físicos y químicos como la gelatinización del almidón, desnaturalización de la proteína, solubilización de algunos carbohidratos simples, ablandamiento, entre otros cambios que hace que el alimento aumente su palatabilidad y su digestibilidad (Wani et al., 2013). Por otro lado, el tiempo de cocción es considerado como una de las características de calidad del grano, al igual que la capacidad y velocidad de absorción de agua en el proceso de hidratación, la apariencia y el sabor. Estas características dependen en gran

parte de la variedad de frijol, como también de la vejez de la semilla luego de ser cosechada y las condiciones de empaque y almacenamiento (Pirhayati et al., 2011).

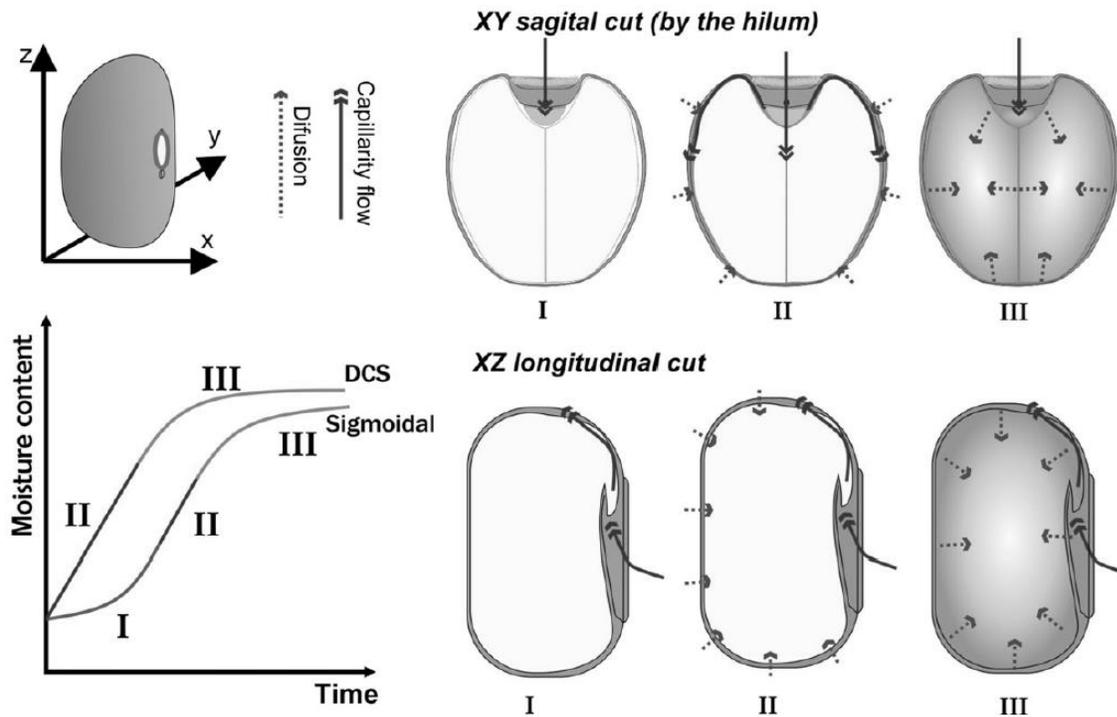
3.4 Hidratación y modelos de hidratación

Generalmente, el contenido de humedad del frijol común se encuentra entre 12 y 16% (Schoeninger et al., 2017). El proceso de hidratación de las semillas de frijol consiste en remojar estas en agua durante un determinado tiempo (incluso varias horas) con el objetivo de aumentar el contenido de humedad en ellas (Miano & Augusto, 2018a). Se considera una hidratación adecuada cuando las semillas han alcanzado un contenido de humedad entre el 53% y 57% (Siddiq et al., 2012). La hidratación de las semillas de frijol promueve la activación de enzimas de la pared celular como la ramnogalacturanosa, galactanasa y poligalacturanosa. Estas enzimas actúan sobre los polisacáridos pécticos que conforman la pectina contribuyendo a la pérdida de la rigidez de la pared celular, motivo por el cual hay una reducción en el tiempo de cocción del frijol una vez las semillas han sido hidratadas, reflejándose en un menor consumo de tiempo, energía térmica y agua en el proceso de cocción (Martínez-Manrique et al., 2011).

3.4.1 Características de la semilla que influyen en la hidratación

El comportamiento de la hidratación de las semillas, generalmente se presenta en dos formas diferentes, el comportamiento cóncavo hacia abajo, y comportamiento sigmoideal, los cuales están directamente relacionados con el grado de permeabilidad de la testa de la semilla y con el contenido inicial de humedad (Miano & Augusto, 2015). Otras características como la estructura y grosor de la cubierta, el tamaño del hilio, la anatomía del micropilo, la capacidad máxima de absorción de agua, y las condiciones en las que se realiza el remojo (temperatura, presión, solución de remojo, entre otras) también influyen en la cinética de hidratación (del Valle et al., 1992).

Figura 3-2. Comportamiento de hidratación (DSC comportamiento cóncavo hacia abajo, Sigmoidal). Corte sagital y representación de absorción de agua en el grano de frijol (I, II, III superior). Corte longitudinal y representación de absorción de agua en el grano de frijol (I,II,III inferior).(Miano & Augusto 2018).



Las rutas de absorción del agua en el frijol común pueden tener entradas específicas durante el proceso de absorción y el fenómeno de transferencia de masa, como la difusión y la capilaridad. La superficie de la cubierta del grano al no presentar grietas hace que sea muy baja la probabilidad de que se dé la absorción de agua mediante capilaridad y más bien esta se puede dar mediante difusión, en donde existe cierto grado de permeabilidad debido a las células macrosclereidas, las cuales son células comunes en esta familia de granos (leguminosas) (Miano & Augusto, 2018a). Por otro lado, el hilio es una región del grano el cual tiene un alto grado de porosidad como para absorber agua por capilaridad, y tiene contacto directo con la radícula de la semilla que en pocas palabras, esta región podría tener una rápida hidratación de la radícula, activando el proceso de germinación de la semilla (Yousif et al., 2007). El comportamiento de hidratación sigmoidal se compone de tres fases: fase inicial o de retraso (fase I), fase exponencial (fase-II), fase de equilibrio (fase-III) (Figura 3-2). Debido a que la cubierta del frijol es altamente impermeable, en la fase-I, el agua inicia la difusión lentamente a través del hilio y el surco hiliar. En la fase-II,

la difusión del agua se da en los intercisos entre el cotiledón y la cubierta de la semilla (por la parte interna), aumentando la permeabilidad de esta. En La fase-III, el cotiledón se hidrata mediante difusión y flujo capilar hasta alcanzar el equilibrio de la hidratación. Por otro lado, si el comportamiento de hidratación es concavo, podría decirse que estamos frente a una semilla cuya cubierta es porosa, y la hidratación se inicia tanto por capilaridad, como por difusión, anulando la fase de latencia (fase-I) (Perera et al., 2023).

3.4.2 Modelos matemáticos para describir la cinética de hidratación

El proceso de hidratación de las semillas se puede explicar a través de una ecuación matemática. Mediante una modelación matemática de la cinética de hidratación es posible predecir el contenido de humedad de la semilla en función del tiempo de remojo o hidratación y el contenido de humedad en equilibrio. Además, se puede obtener un valor la una constante, la cual se pueda relacionar con la fase inicial del proceso de hidratación, especialmente para las hidrataciones con comportamiento sigmoideal (Miano & Augusto, 2015). Se han descrito diferentes modelos matemáticos que expliquen la cinética de hidratación en el frijol común y otras leguminosas. Sin embargo, los modelos matemáticos más comunes encontrados en la literatura científica son el modelo de Kaptso, modelo de Peleg, modelo de primer orden, modelo de Weibull y modelo de Fick.

Modelo de Peleg: los modelos matemáticos como el modelo de Peleg (ecuación 3.1), es propio para el estudio de la hidratación en granos y cereales, cuya absorción tiene un comportamiento cóncavo hacia abajo (Peleg, 1988), y se expresa de la siguiente manera:

$$W(t) = W_0 + \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad (3.1)$$

Donde $W(t)$ es el contenido de humedad en la semilla en el instante t , y W_0 es el contenido de humedad inicial. K_1 y K_2 son las constantes de velocidad de Peleg, y de capacidad de Peleg respectivamente. En este modelo, la humedad en equilibrio, W_e , cuando t tiende al infinito, el modelo toma la forma siguiente (ecuación 3.2):

$$W(e) = W_0 + \frac{1}{(k_2)} \quad (3.2)$$

Modelo de primer orden exponencial: otro modelo representativo en el comportamiento cóncavo hacia abajo, es el modelo de primer orden exponencial (ecuación 3.3) (Ulloa et al., 2016), expresado en la siguiente ecuación:

$$W(t) = W_e + (W_0 - W_e)e^{-kt} \quad (3.3)$$

Donde $W(t)$ es el contenido de humedad en el tiempo t , W_0 es el contenido de humedad inicial, W_e es el contenido de humedad en equilibrio y k (1/min) es la constante de hidratación.

Ley de Fick: las leguminosas estudiadas pueden ser aproximadas en términos geométricos a los diámetros de una esfera, según sea su tamaño. La ley de Fick es una ecuación muy útil para describir diversos casos de difusión de materia de un medio a otro en el que aún no existe un equilibrio (Yildirim et al., 2011). Este modelo matemático (ecuación 3.4) ha sido aplicado para modelar el comportamiento cóncavo hacia abajo de la siguiente manera:

$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{D_e n^2 \pi^2 t}{r^2}\right] \quad (3.4)$$

Donde MR es el contenido de humedad, M_0 es la humedad inicial, M_t es la humedad en el tiempo t , D_e es el coeficiente de difusión efectiva (m^2/s) del agua, r es el radio promedio de la semilla, t es el tiempo de hidratación y n el número de términos de la sumatoria.

Modelo de Weibull: este modelo describe con buena precisión el comportamiento de hidratación cóncavo hacia abajo y sigmoideal (ecuación 3.5), el cual presenta dos parámetros relacionados a la velocidad del proceso de hidratación (α) y a la forma de la fase inicial que toma la cinética de hidratación (Ghafoor et al., 2014):

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3.5)$$

Donde α y β son constantes relacionadas a la velocidad del proceso y el comportamiento de absorción en el material de estudio.

Modelo de Kaptso: este modelo puede predecir el comportamiento de hidratación sigmoideal, en donde sus parámetros de medición están relacionados con la velocidad de

hidratación, el tiempo de fase de retraso (punto de inflexión en la curva), y el equilibrio de la hidratación (ecuación 3.6) (Kaptso et al., 2008).

$$M(t) = \frac{M_{\infty}}{1 + \exp[-k_k(t-\gamma)]} \quad (3.6)$$

Con $M(t)$ es la humedad de las semillas en función del tiempo de remojo, M_{∞} es el contenido de humedad en equilibrio y K es la constante de rehidratación.

3.5 Ultrasonido

El ultrasonido son ondas sonoras, cuya frecuencia supera el umbral de auditivo de los humanos (el oído humano percibe frecuencias del rango entre 20-20000 KHz) (Qiu et al., 2020). Generalmente, las ondas ultrasónicas se pueden clasificar en ultrasonido de potencia o alta intensidad, que opera en un rango de frecuencias entre los 20-100 kHz, en ultrasonido de alta frecuencia, que opera en un rango de 100 kHz-1 MHz y ultrasonido de diagnósticos que opera entre 1-10 MHz (Patist & Bates, 2008). El ultrasonido de potencia es muy común en el procesamiento de alimentos, mientras que el ultrasonido de alta frecuencia está más relacionado con la calidad de los alimentos (Islam et al., 2014). Las propiedades del ultrasonido de potencia y alta frecuencia, permiten controlar ciertas características en los alimentos procesados como la microestructura, modificación de las propiedades funcionales de las proteínas, ácidos grasos, carbohidratos, inactivación de enzimas y/o microorganismos para mejorar la vida útil del alimento, congelación, descongelación, secado y extracción de componentes bioactivos (Awad et al., 2012). Mientras que el intervalo de frecuencias comprendidas entre 1-10 MHz, son útiles principalmente para propósitos de imágenes médicas e industriales (Kek et al., 2013).

3.5.1 Principios básicos de las ondas sonoras

Las ondas sonoras de una sola frecuencia, tiene el concepto común de una onda sinusoidal única, la cual genera perturbaciones de presión sobre el medio de propagación. Sin embargo las ondas de ultrasonidos pueden ser de frecuencias variables, pudiendo interferir entre sí de forma constructiva o destructiva (Shriki, 2014).

Las variables acústicas principales son el periodo y la frecuencia. El periodo (T) es el tiempo que transcurre entre dos puntos equivalentes de la onda (ciclos) y tiene unidades

en el SI de segundos (s). El periodo es el inverso de la frecuencia (ecuación 3.7) y se expresa de la siguiente manera (ecuación 3.7).

$$T = 1/f \quad (3.7)$$

La frecuencia (f) es el número de ciclos completos de la onda por unidad de tiempo, y tiene unidades en el SI derivadas Hertz ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$). Su expresión toma la forma (ecuación 3.8).

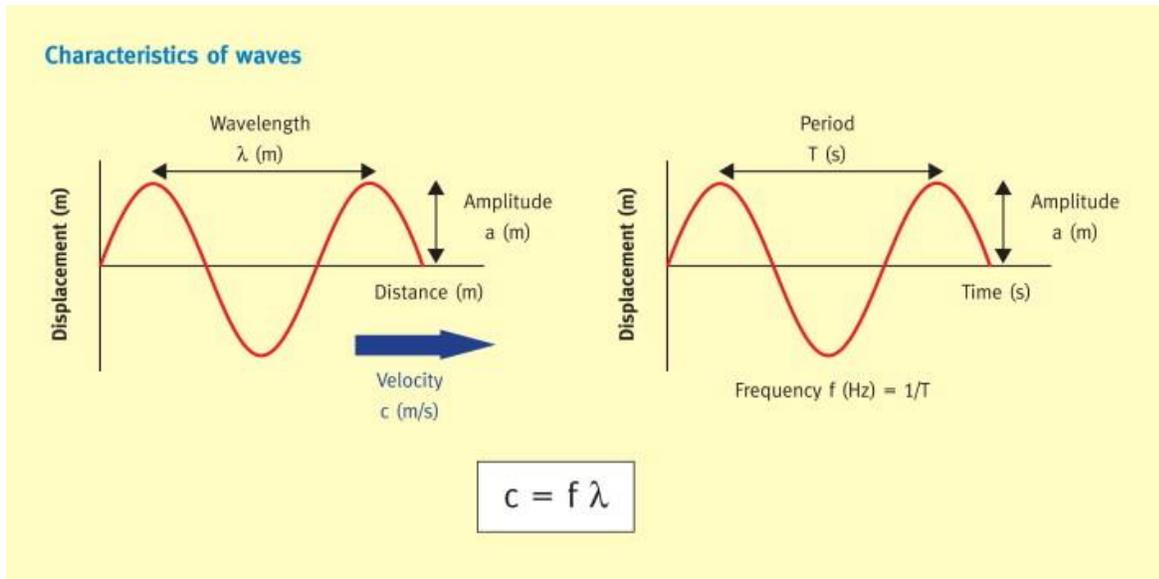
$$f = 1/T \quad (3.8)$$

La longitud de onda (λ) es la distancia entre dos puntos correspondientes de ondas sucesivas y tiene unidades en el SI de metros (m). Alternativamente, la frecuencia (f) y la longitud de onda (λ) está relacionada con la velocidad de propagación de la onda (ecuación 3.9)

$$c = f\lambda \quad (3.9)$$

Finalmente, la amplitud (a) está determinada como el desplazamiento máximo (o mínimo) desde la posición de equilibrio. La figura 3-3 presenta gráficamente las características de las ondas.

Figura 3-3. Características de las ondas (Williams, 2012)

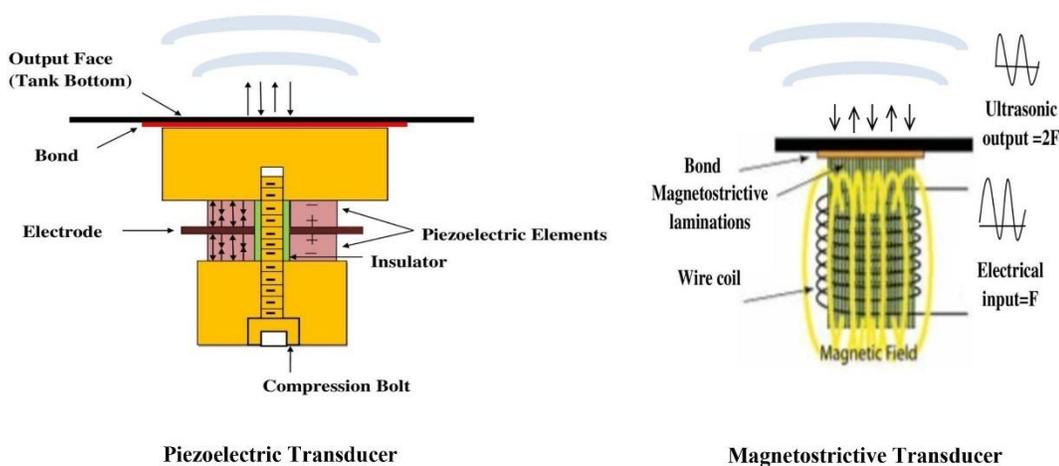


3.5.2 Generadores de ultrasonido

El transductor es el componente más básico capaz de generar onda de ultrasonido, el cual se encarga de transformar los pulsos eléctricos en energía acústica a una intensidad específica (Rana et al., 2017).

Los transductores se clasifican en dos tipos: los piezoeléctricos y los magnetostrictivos. Los transductores piezoeléctricos tienen la función de interconvertir la energía eléctrica en acústica y viceversa a través del principio de piezoelectricidad, cuyo fenómeno físico se basa en la propiedad que tiene ciertos materiales (materiales piezoeléctricos) de crear un potencial eléctrico cuando son sometidos a un estrés mecánico o generar ondas mecánicas (ultrasonidos) cuando son sometidos a un potencial eléctrico (Figura 3-4). Los transductores magnetostrictivos funcionan mediante el fenómeno físico de magnetostricción, cuyos materiales con ciertas características tienen la propiedad de cambiar su longitud de forma fraccional cuando experimentan un campo magnético, generando vibraciones ultrasónicas según sea la frecuencia del campo magnético experimentado (Bhargava et al., 2021).

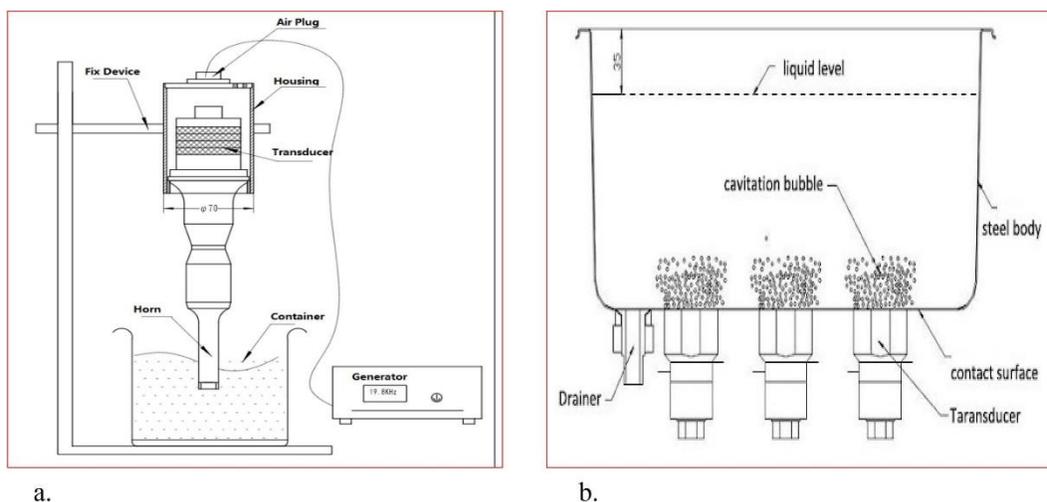
Figura 3-4. Tipos de transductores generadores de ultrasonidos. (Bhargava et al., 2021)



Los métodos de aplicación del ultrasonido se pueden realizar mediante exposición directa o mediante un instrumento como un sonotrodo o baño de agua ultrasónico. El sonotrodo se compone de un generador que produce una corriente alterna con una frecuencia específica de ultrasonido. El transductor se encarga de convertir la corriente eléctrica en fuerzas mecánicas y mediante un amplificador las ondas mecánicas son convertidas en

ondas de sonido, las cuales son transmitidas al sonotrodo. El baño de ultrasonido, se compone por transductores piezoeléctricos los cuales comúnmente están ubicados en el fondo del baño del ultrasonido. Los transductores generan ondas de alta intensidad, las cuales interactúan en el líquido del baño del ultrasonido, generando ciclos de compresión y rarefacción creando una implosión o colapso en las burbujas del líquido, conocido como efecto de cavitación (Ampofo & Ngadi, 2022). A continuación, se presenta un esquema de los métodos de aplicación de ultrasonido.

Figura 3-5. Esquema de los métodos de aplicación de ultrasonido. Mediante sonotrodo (a); mediante un baño de ultrasonidos (b). (Ampofo & Ngadi, 2022)

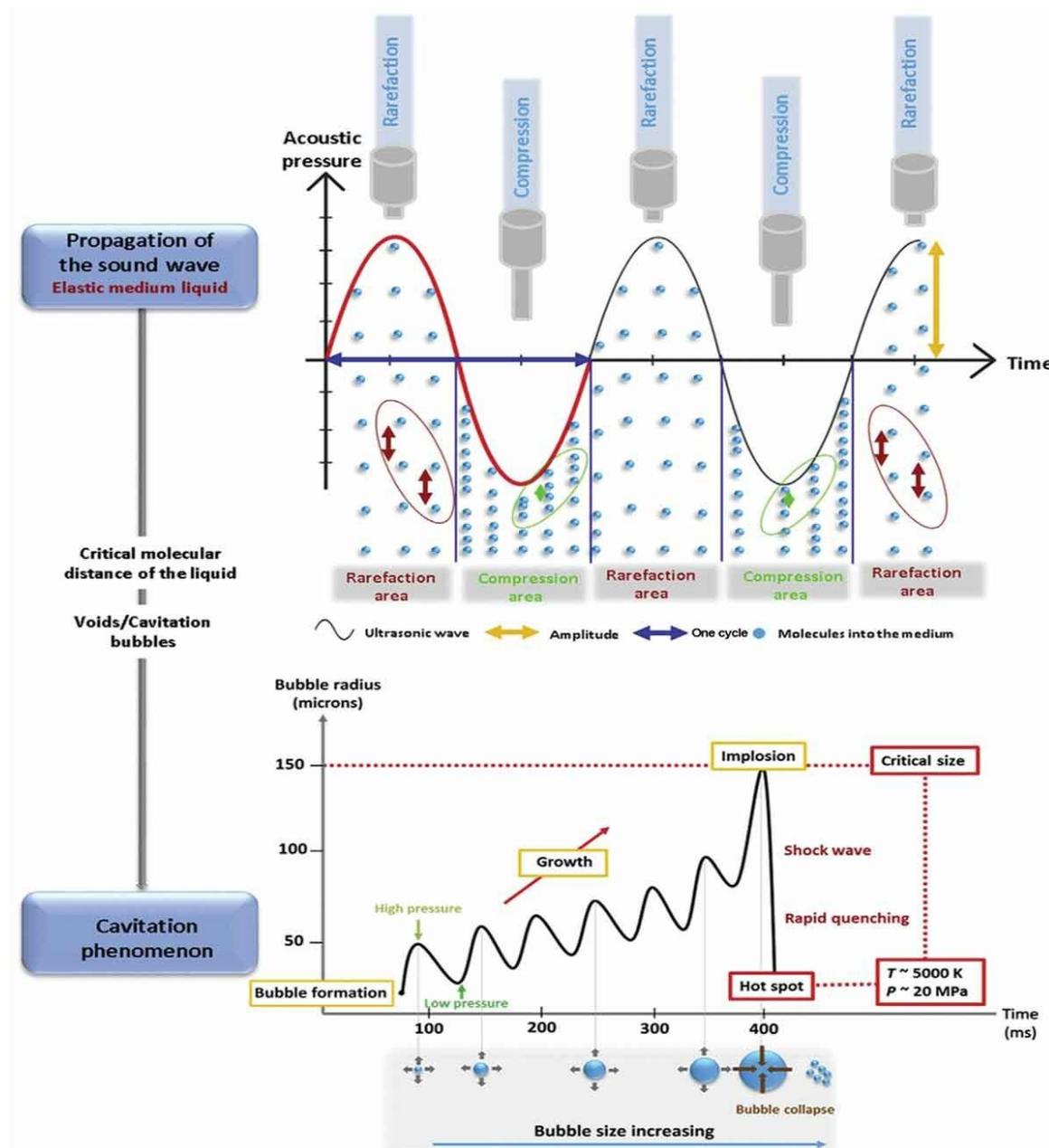


3.5.3 Ultrasonidos y cavitación

El fenómeno de cavitación comprende la formación, crecimiento y colapso de microburbujas dentro de la solución debido a las fluctuaciones de las presiones negativas y positivas generadas por el campo de ultrasonido (Soltani Firouz et al., 2019). Durante el ciclo de presión negativa, la distancia intermolecular excede la distancia máxima, superando la fuerza de enlace molecular entre ellas, creando vacíos en los puntos débiles (impurezas gaseosas), llevando a la formación de burbujas de gas, que crecen continuamente por el mecanismo de difusión rectificadas. Las burbujas formadas en este proceso suelen crecer hasta un tamaño determinado dependiendo de la frecuencia aplicada de ultrasonido, que cuando alcanzan un tamaño crítico, estas colapsan violentamente, debido al ciclo de presión positiva, pudiendo generar cada implosión de

burbuja temperaturas locales de 4500-500 K y presiones locales mayores a 1000 atm (Chavan et al., 2022).

Figura 3-6. Ciclos de compresión y rarefacción inducidos por el ultrasonido (K. Das et al., 2022)



3.5.4 Aplicaciones del ultrasonido en la industria alimentaria

Dependiendo la frecuencia e intensidad operacional, el ultrasonido tiene diversas aplicaciones en la industria alimentaria y estas se clasifican teniendo en cuenta las condiciones de operabilidad. La primera clasificación está relacionada con el uso del ultrasonido de potencia de baja frecuencia y alta energía, cuyo rango de operabilidad está entre 20-800kHz. El ultrasonido de potencia es útil en el área del procesamiento de alimentos, por ejemplo; en procesos de congelación y descongelación, extracción de compuestos naturales, secado, entre otros. La segunda clasificación está relacionada con el uso del ultrasonido de diagnóstico de alta frecuencia y baja energía, cuyo rango de operabilidad está a partir de 1 MHz (Tao & Sun, 2015). El ultrasonido de diagnóstico es útil para obtener información con respecto a las propiedades fisicoquímicas de los alimentos como, por ejemplo; la composición, estructura, tamaño de partículas, entre otros (Fan et al., 2021)

Una de las aplicaciones novedosas del ultrasonido de baja frecuencia y alta energía (rango de intensidades de 10-1000 W/cm²) está relacionada en la conservación de la microestructura de los alimentos, ya que el fenómeno de cavitación inducido por las ondas ultrasónicas promueven la nucleación, logrando controlar la distribución y el tamaño de los cristales de hielo (Chow et al., 2005). Además, el ultrasonido de alta energía mejora la transferencia de calor y masa entre sistemas, lo que permite reducir significativamente el tiempo de congelación, mejorando la calidad del producto (Dalvi-Isfahan et al., 2017). Se debe agregar que, la congelación más que una operación unitaria, es también un proceso de gran importancia para la conservación y alargamiento de la vida útil del alimento (generalmente -18 °C o menos), al igual que otros procesos de conservación como el secado, los cuales son aceptados ampliamente en la industria alimentaria. Para el proceso de congelación, uno de los parámetros importantes que determina la calidad final de congelación es la tasa de congelación, puesto que un proceso de congelación lento tiende a formar grandes cristales de hielo, rompiendo las paredes celulares que compone al alimento, provocando una pérdidas graves por goteo cuando este inicie el proceso de descongelación para su posterior consumo (K. Das et al., 2022).

El ultrasonido de baja frecuencia y alta energía también ha ganado una importancia gradual en los procesos de extracción, ya que las extracciones convencionales están limitadas a

una mayor demanda de tiempo y consumo de solvente (Agregán et al., 2021). Generalmente, en la extracción convencional, los compuestos termosensibles están expuestos a la degradación térmica, debido al largo tiempo y altas temperaturas del proceso de extracción. Por otro lado, la interacción de las ondas ultrasónicas entre el solvente y la matriz de la muestra facilita el proceso de extracción, ya que el efecto de cavitación generado por el ultrasonido mejora la transferencia de masa entre el solvente y la matriz, reduciendo el tiempo y temperatura de extracción, evitando así la evaporación del solvente y requiriendo menos consumo, como también minimizando la degradación de los compuestos termosensibles (Fu et al., 2021).

Otras aplicaciones del ultrasonido de baja frecuencia y alta potencia, está dirigida a la inactivación de enzimas. Las enzimas son de gran interés en el procesamiento de alimentos, ya que su actividad enzimática genera cambios físicos y químicos en el alimento, teniendo un efecto en las propiedades organolépticas de este. Gracias a la cavitación generada por el ultrasonido, cuando las burbujas colapsan, se crean altas presiones en la región próxima al colapso de la burbuja además, de un aumento de temperaturas local, provocando una serie de efectos en el sistema y en el material involucrada entre ellos, la desnaturalización de las proteínas, y posterior inactivación de las enzimas (Islam et al., 2014).

3.5.5 El ultrasonido en la hidratación de alimentos

El ultrasonido se ha utilizado como pretratamiento en operaciones de hidratación, mejorando el proceso de hidratación y reduciendo el tiempo requerido para este. Miano et al. (2017) sugirieron que la aplicación del ultrasonido mejoró significativamente la absorción de agua y redujo el tiempo del proceso de hidratación en granos de maíz sin que se viera afectado las propiedades del almidón. Resultados similares fueron observados en la hidratación de sorgo, en donde la aplicación del ultrasonido aceleró el proceso de hidratación y el contenido de humedad (Patero & Augusto, 2015). Ulloa et al. (2015) asociaron el uso del ultrasonido a la mejora en el proceso de hidratación en seis variedades de frijol estudiadas, como también identificaron una mejoría en los tiempos de cocción. Resultados análogos se obtuvieron para el frijol blanco “blanquillo”, cuya aplicación del ultrasonido, combinada con la temperatura, mejoraron la cinéticas de hidratación y el tiempo de cocción (Miano, Sabadoti, Pereira, et al., 2018). Esta tecnología del ultrasonido también se ha empleado como herramienta para rehidratar de ciertos alimentos que han

sido sometidos a operaciones de secado para disminuir la actividad del agua en ellos y alargar su tiempo de vida de consumo. Por ejemplo, Tao et al. (2019), encontraron que la aplicación del ultrasonido en el proceso de rehidratación del repollo mejora el porcentaje de absorción de este. También se encontraron resultados similares en el pimiento verde seco (Szadzińska et al., 2017), y en las zanahorias secas tratadas con ultrasonido (Ricce et al., 2016). También, el ultrasonido no sólo se aplica a alimentos de origen vegetal, sino también de origen animal. Aksoy et al. (2020) reportaron que la aplicación del ultrasonido mejora la tasa de hidratación en la carne picada, en comparación a la muestra control. Sin embargo, los autores dejan abierta la investigación para estudiar el efecto de otras propiedades del ultrasonido que podrían tener en la hidratación del frijol. No obstante, son pocos los estudios realizados en donde se enfoquen al efecto de la hidratación del frijol cuando este es expuesto a diferentes variables como tiempo de sonicación, potencia de sonicación y temperatura del medio de sonicación. Es necesario evaluar entonces, mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR) los efectos de las diferentes variables y sus interacciones.

3.6 Bibliografía

- Abbas, Y., & Ahmad, A. (2018). Impact of processing on nutritional and antinutritional factors of legumes: A review. *Annal. Food Science and Technology*, 19(2), 199–215. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2433>
- Agregán, R., Munekata, P. E. S., Feng, X., Astray, G., Gullón, B., & Lorenzo, J. M. (2021). Recent advances in the extraction of polyphenols from eggplant and their application in foods. *Lwt*, 146(December 2020), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111381>
- Aksoy, A., Karasu, S., Akcicek, A., & Kayacan, S. (2020). *Effects of Different Drying Methods on Untargeted*. 8(216), 1–23.
- Allali, S., Brousse, V., Sacri, A. S., Chalumeau, M., & de Montalembert, M. (2017). Anemia in children: prevalence, causes, diagnostic work-up, and long-term consequences. *Expert Review of Hematology*, 10(11), 1023–1028. <https://doi.org/10.1080/17474086.2017.1354696>
- Ampofo, J., & Ngadi, M. (2022). Ultrasound-assisted processing: Science, technology and challenges for the plant-based protein industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 84(February), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105955>
- Argyridis, S. (2019). Folic acid in pregnancy. *Obstetrics, Gynaecology and Reproductive Medicine*, 29(4), 118–120. <https://doi.org/10.1016/j.ogrm.2019.01.008>
- Augustin, M. A., & Cole, M. B. (2022). Towards a sustainable food system by design using faba bean protein as an example. *Trends in Food Science and Technology*, 125(April), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.029>

-
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, *48*(2), 410–427. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
- Batista, K. A., Prudêncio, S. H., & Fernandes, K. F. (2011). Wheat Bread Enrichment with Hard-to-Cook Bean Extruded Flours: Nutritional and Acceptance Evaluation. *Journal of Food Science*, *76*(1), 108–113. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01969.x>
- Beebe, S., Gonzalez, A. V., & Rengifo, J. (2000). Research on trace minerals in the common bean. *Food and Nutrition Bulletin*, *21*(4), 387–391. <https://doi.org/10.1177/156482650002100408>
- Beebe, S., Rengifo, J., Gaitan, E., Duque, M. C., & Tohme, J. (2001). Plant genetic resources: Diversity and origin of Andean landraces of common bean. *Crop Science*, *41*(3), 854–862. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.413854x>
- Belmiro, R. H., Tribst, A. A. L., & Cristianini, M. (2018). Impact of high pressure processing in hydration and drying curves of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *47*, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.013>
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., & Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, *70*(June 2020), 105293. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>
- Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, *43*(2), 414–431. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003>
- Campbell, I. (2017). Macronutrients, minerals, vitamins and energy. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, *18*(3), 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2016.11.014>
- Cardoso, R. V. C., Fernandes, Â., González-Paramás, A. M., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2019). Flour fortification for nutritional and health improvement: A review. *Food Research International*, *125*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108576>
- Chavan, P., Sharma, P., Sharma, S. R., Mittal, T. C., & Jaiswal, A. K. (2022). Application of High-Intensity Ultrasound to Improve Food Processing Efficiency: A Review. *Foods*, *11*(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/foods11010122>
- Chow, R., Blindt, R., Chivers, R., & Povey, M. (2005). A study on the primary and secondary nucleation of ice by power ultrasound. *Ultrasonics*, *43*(4), 227–230. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.06.006>
- Costa, R., Fusco, F., & Gândara, J. F. M. (2018). Mass transfer dynamics in soaking of chickpea. *Journal of Food Engineering*, *227*(2018), 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.004>
- Creus, E. G. (2004). Compuestos fenólicos. Un análisis de sus beneficios para la salud. *Ambito Farmaceutico Nutricion*, *23*(6), 80–84.

- Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Xanthakis, E., & Le-Bail, A. (2017). Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields. *Journal of Food Engineering*, 195(2017), 222–234. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.10.001>
- Das, G., Sharma, A., & Sarkar, P. K. (2022). Conventional and emerging processing techniques for the post-harvest reduction of antinutrients in edible legumes. *Applied Food Research*, 2(1), 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100112>
- Das, K., Zhang, M., Bhandari, B., Chen, H., Bai, B., & Roy, M. C. (2022). Ultrasound generation and ultrasonic application on fresh food freezing: Effects on freezing parameters, physicochemical properties and final quality of frozen foods. *Food Reviews International*, 00(00), 1–23. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2027436>
- De Ron, M. A., Papa, R., Bitocchi, E., González, A. M., Debouck, D. G., Brick, M. A., Fourie, D., Marsolais, F., James, B., Geffroy, V., Mc Clean, P., Santalla, M., Lozano, R., Yuste-Lisbona, F., & Casquero, P. A. (2015). Common Bean. In *Grain Legumes* (pp. 1–36). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2797-5>
- Debouck, D., & Hidalgo, R. (1985). Morfología de la planta de frijol. In M. Lopez, F. Fernandez, & A. van Schoonhoven (Eds.), *Frijol: Investigación y producción* (2nd ed., p. 169). Programa de las Naciones Unidas.
- del Valle, J. M., Cottrell, T. J., Jackman, R. L., & Stanley, D. W. (1992). Hard-to-cook defect in black beans: the contribution of proteins to salt soaking effects. *Food Research International*, 25(6), 429–436. [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(92\)90167-4](https://doi.org/10.1016/0963-9969(92)90167-4)
- Doma, K. M., Farrell, E. L., Leith-Bailey, E. R., Soucier, V. D., & Duncan, A. M. (2019). Motivators, Barriers and Other Factors Related to Bean Consumption in Older Adults. *Journal of Nutrition in Gerontology and Geriatrics*, 38(4), 397–413. <https://doi.org/10.1080/21551197.2019.1646690>
- Drulyte, D., & Orlie, V. (2019). The Effect of Processing on Digestion of Legume Proteins. *Foods*, 2019(8), 224–232.
- Fabbri, A. D. T., & Crosby, G. A. (2016). A review of the impact of preparation and cooking on the nutritional quality of vegetables and legumes. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 3, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2015.11.001>
- Fan, K., Wu, J., & Chen, L. (2021). Ultrasound and its combined application in the improvement of microbial and physicochemical quality of fruits and vegetables: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 80(2021), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105838>
- FAO/WHO Expert Consultation. (2011). Dietary protein quality evaluation in human nutrition. In *FAO food and nutrition paper* (Vol. 92).
- FAO. (2021). *Top 20 countries production of beans, dry 2020*. https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity
- Feregrino-Pérez, A. A., Berumen, L. C., García-Alcocer, G., Guevara-Gonzalez, R. G., Ramos-Gomez, M., Reynoso-Camacho, R., Acosta-Gallegos, J. A., & Loarca-Piña,

- G. (2008). Composition and chemopreventive effect of polysaccharides from common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) on azoxymethane-induced colon cancer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(18), 8737–8744. <https://doi.org/10.1021/jf8007162>
- Fu, X., Wang, D., Belwal, T., Xie, J., Xu, Y., Li, L., Zou, L., Zhang, L., & Luo, Z. (2021). Natural deep eutectic solvent enhanced pulse-ultrasonication assisted extraction as a multi-stability protective and efficient green strategy to extract anthocyanin from blueberry pomace. *LWT*, *144*(January), 1–52. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111220>
- Gallo, M., Ferrara, L., & Naviglio, D. (2018). Application of ultrasound in food science and technology: A perspective. *Foods*, *7*(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/foods7100164>
- Gani, A., & Ashwar, B. A. (2021). Food biopolymers: Structural, functional and nutraceutical properties. In *Food biopolymers: Structural, functional and nutraceutical properties*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27061-2>
- Ghafoor, M., Misra, N. N., Mahadevan, K., & Tiwari, B. K. (2014). Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). *Ultrasonics Sonochemistry*, *21*(1), 409–414. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.05.016>
- Gharibzahedi, S. M. T., & Jafari, S. M. (2017). The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. *Trends in Food Science and Technology*, *62*, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.017>
- Giuberti, G., Tava, A., Mennella, G., Pecetti, L., Masoero, F., Sparvoli, F., Fiego, A. Lo, & Campion, B. (2019). Nutrients' and antinutrients' seed content in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines carrying mutations affecting seed composition. *Agronomy*, *9*(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy9060317>
- Gomes Basso Los, F., Ferreira Zielinski, A. A., Wojeicchowski, J. P., Nogueira, A., & Demiate, I. M. (2018). Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): whole seeds with complex chemical composition. *Current Opinion in Food Science*, *19*, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.010>
- Guimarães, B., Polachini, T. C., Augusto, P. E. D., & Telis-Romero, J. (2020). Ultrasound-assisted hydration of wheat grains at different temperatures and power applied: Effect on acoustic field, water absorption and germination. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *155*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108045>
- Gupta, R. K., Gangoliya, S. S., & Singh, N. K. (2013). Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(2), 676–684. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0978-y>
- Hart, J. J., Tako, E., Kochian, L. V., & Glahn, R. P. (2015). Identification of Black Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Polyphenols That Inhibit and Promote Iron Uptake by Caco-2 Cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *63*(25), 5950–5956. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00531>

- Hayat, I., Ahmad, A., Masud, T., Ahmed, A., & Bashir, S. (2014). Nutritional and Health Perspectives of Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): An Overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *54*(5), 580–592. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.596639>
- Howard, L. R., White, B. L., Uebersax, M. A., & Siddiq, M. (2018). Dry beans processing, quality evaluation, and nutrition. *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing: Second Edition*, 2–2, 559–587. <https://doi.org/10.1002/9781119098935.ch24>
- Islam, M. N., Zhang, M., & Adhikari, B. (2014). The Inactivation of Enzymes by Ultrasound-A Review of Potential Mechanisms. *Food Reviews International*, *30*(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/87559129.2013.853772>
- Jara, C., & Giraldo, D. (2016). *Manejo Agronómico de Fríjol CARTILLA* (p. 7). Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Kaptso, K. G., Njintang, Y. N., Komnek, A. E., Hounhouigan, J., Scher, J., & 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*(1), 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.014>
- Kek, S. P., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2013). Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, *91*(4), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.05.003>
- Kotha, R. R., Finley, J. W., & Luthria, D. L. (2020). Determination of Soluble Mono, Di, and Oligosaccharide Content in 23 Dry Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *68*(23), 6412–6419. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00713>
- Krebs, N. F., Miller, L. V., & Michael Hambidge, K. (2014). Zinc deficiency in infants and children: A review of its complex and synergistic interactions. *Paediatrics and International Child Health*, *34*(4), 279–288. <https://doi.org/10.1179/2046905514Y.0000000151>
- Lee, C., Kim, E., Kim, H., Heo, W., Ahn, S., Park, J., Ban, C., & Lim, S. (2023). Comparison of the pretreatment methods for enhancing hydration of water-soaked adzuki beans (*Vigna angularis*). *Food Science and Biotechnology*, *2023*(March), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01294-1>
- Lépiz-Ildefonso, R., Chavarín-Espinoza, I. E., López-Alcocer, J. de J., & Rodríguez-Guzmán, E. (2018). ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA DURANTE LAS ETAPAS DE DESARROLLO DE VARIETADES DE FRIJOL. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *41*(3), 275–283. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.275-283>
- Li, P., Li, Y., Wang, L., Zhang, H., Qi, X., & Qian, H. (2020). Study on water absorption kinetics of black beans during soaking. *Journal of Food Engineering*, *283*(September 2019), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110030>
- Liu, G., Gu, Z., Hong, Y., Cheng, L., & Li, C. (2017). Structure, functionality and applications of debranched starch: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 63). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.004>

-
- López, L. ., Ulloa, J. ., Ulloa, P. R., Ramirez, J. ., Carrillo Silva, Y., & Ramos Quintero, A. (2017). Modelling of hydration of bean(*Phaseolus Vulgaris L. .*): Effect of the Low-Frequency Ultrasound. *Journal Food Science*, 29(September), 288–301. <https://doi.org/10.14674/1120-1770>
- Martínez-Manrique, E., Jacinto-Hernández, C., Garza-García, R., Campos, A., Moreno, E., & Bernal-Lugo, I. (2011). Enzymatic changes in pectic polysaccharides related to the beneficial effect of soaking on bean cooking time. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(13), 2394–2398. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4474>
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2015). From the sigmoidal to the downward concave shape behavior during the hydration of grains: Effect of the initial moisture content on Adzuki beans (*Vigna angularis*). *Food and Bioproducts Processing*, 96(Fao), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.06.007>
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2018). The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 352–370. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12328>
- Miano, A. C., Ibarz, A., & Augusto, P. E. D. (2016). Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.020>
- Miano, A. C., Ibarz, A., & Augusto, P. E. D. (2017). Ultrasound technology enhances the hydration of corn kernels without affecting their starch properties. *Journal of Food Engineering*, 197, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.10.024>
- Miano, A. C., Pereira, J. D. C., Castanha, N., Júnior, M. D. D. M., & Augusto, P. E. D. (2016). Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: Description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Scientific Reports*, 6(November), 1–14. <https://doi.org/10.1038/srep38996>
- Miano, A. C., Sabadoti, V. D., & Augusto Duarte, P. E. (2018). Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. *Journal of Food Engineering*, 225, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.015>
- Miano, A. C., Sabadoti, V. D., Pereira, J. da C., & Augusto, P. E. D. (2018). Hydration kinetics of cereal and pulses: New data and hypothesis evaluation. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12617>
- Minagricultura. (2020). *Cadena del Fríjol*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/AlimentosBalanceados/Documentos/2020-03-31/CifrasSectorialesfrijol.pdf>
- Nieto, C. (2014). Técnicas de cocción: sabor, color, textura y nutrientes a buen recaudo. *Farmacia Profesional*, 28(4), 15–19.
- Nyau, V. (2014). Nutraceutical perspectives and utilization of common beans (. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 9483–9496.

- Orozco, J. C., Londoño, L. F., Jaramillo, A. M., & Patiño, G. (2020). Estudio de la bioaccesibilidad in vitro de zinc en arroz (*oryza sativa*) y su relación con el contenido de ácido fítico. *Revista Chilena de Nutrición*, *47*(2), 171–180. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182020000200171>
- Ortiz-Monasterio, J. I., Palacios-Rojas, N., Meng, E., Pixley, K., Trethowan, R., & Peña, R. J. (2007). Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding. *Journal of Cereal Science*, *46*(3), 293–307. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.005>
- Ovando-Martínez, M., Bello-Pérez, L. A., Whitney, K., Osorio-Díaz, P., & Simsek, S. (2011). Starch characteristics of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in different localities. *Carbohydrate Polymers*, *85*(1), 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.01.043>
- Patero, T., & Augusto, P. E. D. (2015). Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains. *Ultrasonics Sonochemistry*, *23*, 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.10.021>
- Patist, A., & Bates, D. (2008). Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *9*(2), 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.004>
- Peleg, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *Journal of Food Science*, *53*(4), 1216–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>
- Pereira, E. J., Carvalho, L. M. J., Dellamora-Ortiz, G. M., Cardoso, F. S. N., & Carvalho, J. L. V. (2016). Effect of different home-cooking Methods on the bioaccessibility of zinc and iron in conventionally bred cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) consumed in Brazil. *Food and Nutrition Research*, *60*. <https://doi.org/10.3402/fnr.v60.29082>
- Perera, D., Devkota, L., Garnier, G., Panozzo, J., & Dhital, S. (2023). Hard-to-cook phenomenon in common legumes: Chemistry, mechanisms and utilisation. *Food Chemistry*, *415*(September 2022), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135743>
- Pérez-Perez, L. M., Del Toro Sánchez, C. L., Sánchez Chavez, E., González Vega, R. I., Reyes Díaz, A., Borboa Flores, J., Soto Parra, J. M., & Flores-Cordova, M. A. (2019). Bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes de diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México, mediante un sistema gastrointestinal in vitro//Bioaccessibility of antioxidant compounds from different bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L. *Biotecnia*, *22*(1), 117–125. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1159>
- Petry, N., Boy, E., Wirth, J. P., & Hurrell, R. F. (2015). Review: The potential of the common bean (*phaseolus vulgaris*) as a vehicle for iron biofortification. *Nutrients*, *7*(2), 1144–1173. <https://doi.org/10.3390/nu7021144>
- Petry, N., Egli, I., Zeder, C., Walczyk, T., & Hurrell, R. (2010). Polyphenols and phytic acid contribute to the low iron bioavailability from common beans in young women. *Journal of Nutrition*, *140*(11), 1977–1982. <https://doi.org/10.3945/jn.110.125369>

-
- Piñon, M., Alarcon-Rojo, A., Paniwnyk, L., Mason, T., Luna, L., & Renteria, A. (2019). Ultrasound for improving the preservation of chicken meat. *Food Science and Technology*, 39(June), 129–135. <https://doi.org/10.1590/fst.39017>
- Pirhayati, M., Soltanizadeh, N., & Kadivar, M. (2011). Chemical and microstructural evaluation of “hard-to-cook” phenomenon in legumes (pinto bean and small-type lentil). *International Journal of Food Science and Technology*, 46(9), 1884–1890. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02697.x>
- Qiu, L., Zhang, M., Chitrakar, B., & Bhandari, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68(April), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230>
- Quiñones, M., Miguel, M., & Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutricion Hospitalaria*, 27(1), 76–89. <https://doi.org/10.3305/nh.2012.27.1.5418>
- Rana, A., Vishvavidyalya, K., Pradesh, H., Meena Parmar, I. Y., & Anita Rana, C. (2017). Ultrasonic processing and its use in food industry: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 5(6), 1961–1968.
- Ranjbari, A., Kashaninejad, M., Aalami, M., Khomeiri, M., & Gharekhani, M. (2013). Effect of ultrasonic pre-treatment on water absorption characteristics of chickpeas (*Cicer arietinum*). *Latin American Applied Research*, 43(2), 153–159.
- Reynoso-Camacho, R., & Ramoz-Gomez, M. (2006). Bioactive components in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Research Signpost*, 661(2), 217–236.
- Ricce, C., Rojas, M. L., Miano, A. C., Siche, R., & Augusto, P. E. D. (2016). Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89, 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.030>
- Rios, B., & Quiroz, D. (2002). *El frijol (Phaseolus vulgaris L.) Cultivo, Beneficio y Variedades* (p. 193). Convenio FENALCE.
- Sánchez-Arteaga, H. M., Urías-Silvas, J. E., Espinosa-Andrews, H., & García-Márquez, E. (2015). Effect of chemical composition and thermal properties on the cooking quality of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *CYTA - Journal of Food*, 13(3), 385–391. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.988182>
- Satya, S., Kaushik, G., & Naik, S. N. (2010). Processing of food legumes: A boon to human nutrition. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 3, 183–195. <https://doi.org/10.1007/s12349-010-0017-8>
- Schoeninger, V., Coelho, S. R. M., & Bassinello, P. Z. (2017). Industrial processing of canned beans. *Ciência Rural*, 47(5), 1–9. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160672>
- Shergill-Bonner, R. (2017). Micronutrients. *Paediatrics and Child Health (United Kingdom)*, 27(8), 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.paed.2017.04.002>
- Shriki, J. (2014). Ultrasound physics. *Critical Care Clinics*, 30(1), 1–24.

<https://doi.org/10.1016/j.ccc.2013.08.004>

- Siddiq, M., Masood, S. B., & Sultan, M. T. (2012). Dry Beans and Pulses Production, Processing and Nutrition. *Dry Beans and Pulses Production, Processing and Nutrition*, 545–564. <https://doi.org/10.1002/9781118448298>
- Singh, B., Singh, J. P., Shevkani, K., Singh, N., & Kaur, A. (2017). Bioactive constituents in pulses and their health benefits. *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 858–870. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2391-9>
- Sinkovič, L., Pipan, B., Šibul, F., Nemeš, I., Tepić Horecki, A., & Meglič, V. (2023). Nutrients, Phytic Acid and Bioactive Compounds in Marketable Pulses. *Plants*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants12010170>
- Soltani Firouz, M., Farahmandi, A., & Hosseinpour, S. (2019). Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products industries: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57(April), 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.014>
- Suárez-Martínez, S. E., Ferriz-Martínez, R. A., Campos-Vega, R., Elton-Puente, J. E., De La Torre Carbot, K., & García-Gasca, T. (2016). Bean seeds: Leading nutraceutical source for human health. *CYTA - Journal of Food*, 14(1), 131–137. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1063548>
- Szadzińska, J., Łechtańska, J., Kowalski, S. J., & Stasiak, M. (2017). The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.030>
- Taha, A., Mehany, T., Pandiselvam, R., Anusha Siddiqui, S., Mir, N. A., Malik, M. A., Sujayasree, O. J., Alamuru, K. C., Khanashyam, A. C., Casanova, F., Xu, X., Pan, S., & Hu, H. (2023). Sonoprocessing: mechanisms and recent applications of power ultrasound in food. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–39. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2161464>
- Tajoddin, M., Manohar, S., & Lalitha, J. (2014). Effect of soaking and germination on polyphenol content and polyphenol oxidase activity of mung bean (*Phaseolus Aureus* L.) cultivars differing in seed color. *International Journal of Food Properties*, 17(4), 782–790. <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.654702>
- Tao, Y., Han, M., Gao, X., Han, Y., Show, P. L., Liu, C., Ye, X., & Xie, G. (2019). Applications of water blanching, surface contacting ultrasound-assisted air drying, and their combination for dehydration of white cabbage: Drying mechanism, bioactive profile, color and rehydration property. *Ultrasonics Sonochemistry*, 53(December 2018), 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.003>
- Tao, Y., & Sun, D. W. (2015). Enhancement of Food Processes by Ultrasound: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(4), 570–594. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.667849>
- Ulloa, J. A., Enríquez López, K. V., Contreras Morales, Y. B., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, 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*, 13(4), 588–596. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1024173>
- Ulloa, J. A., Rosas-Ulloa, P., Ramírez-Ramírez, J. C., & Ulloa-Rangel, B. E. (2016). Modelación matemática de las cinéticas de hidratación a diferentes temperaturas de cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L) producidas en México. *CienciaUAT*, 10(2), 52–62. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v10i2.542>
- Vásquez, U., Siche, R., & Miano, A. C. (2021). Ultrasound-assisted hydration with sodium bicarbonate solution enhances hydration-cooking of pigeon pea. *LWT*, 144(February), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111191>
- Wainaina, I., Wafula, E., Sila, D., Kyomugasho, C., Grauwet, T., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2021). Thermal treatment of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Factors determining cooking time and its consequences for sensory and nutritional quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3690–3718. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12770>
- Wani, I. A., Sogi, D. S., & Gill, B. S. (2013). Physical and cooking characteristics of black gram (*Phaseolus mungoo* L.) cultivars grown in India. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(12), 2557–2563. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12249>
- Williams, D. (2012). The physics of ultrasound. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 13(6), 264–268. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2012.03.010>
- Wood, J. A. (2017). Evaluation of cooking time in pulses: A review. *Cereal Chemistry*, 94(1), 32–48. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-16-0127-FI>
- Yang, Q. Q., Gan, R. Y., Ge, Y. Y., Zhang, D., & Corke, H. (2018). Polyphenols in Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Chemistry, Analysis, and Factors Affecting Composition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17, 1518–1539. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12391>
- Yildirim, A., & Öner, M. D. (2015). Electrical conductivity, water absorption, leaching, and color change of chickpea (*Cicer arietinum* L.) during soaking with ultrasound treatment. *International Journal of Food Properties*, 18(6), 1359–1372. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.917660>
- Yildirim, A., Öner, M. D., & Bayram, M. (2011). Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. *Journal of Food Engineering*, 104(1), 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.005>
- Yousif, A. M., Kato, J., & Deeth, H. C. (2007). Effect of storage on the biochemical structure and processing quality of adzuki bean (*Vigna angularis*). In *Food Reviews International* (Vol. 23, Issue 1). <https://doi.org/10.1080/87559120600865172>
- Zamindar, N., Baghekhanda, M. S., Nasirpour, A., & Sheikhzeinoddin, M. (2013). Effect of line, soaking and cooking time on water absorption, texture and splitting of red kidney beans. *Journal of Food Science and Technology*, 50(1), 108–114. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0234-2>
- Zehring, J., Walter, S., Quendt, U., Zocher, K., & Rohn, S. (2022). Phytic Acid Content of Faba Beans (*Vicia faba*)—Annual and Varietal Effects, and Influence of Organic Cultivation Practices. *Agronomy*, 12(4), 1–14.

<https://doi.org/10.3390/agronomy12040889>

4. Optimización del proceso de hidratación por ultrasonido

Resumen

Se estudió el comportamiento de la hidratación en dos variedades de frijol, BIO101 y Nima-Calima mediante el método de hidratación convencional (HC) y el método de hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido (HCPU). Se evaluaron 5 modelos matemáticos con la finalidad de encontrar el modelo que mejor se ajustara a los datos obtenidos en la HC y posteriormente predecir con este modelo el tiempo de hidratación adecuado (t_{ha}) para alcanzar un contenido de humedad del 53% b.h. Se encontró que el modelo de Weibull fue el modelo que mejor se ajustó ($R^2=0.996-0.998$; $RMSE=0.951-0.578$) prediciendo un t_{ha} de 9.5 y 6.0 h para la variedad BIO101 y Nima-Calima respectivamente. Se optimizó el método de HCPU mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR), donde se evaluaron los factores de temperatura del medio de sonicación, tiempo de sonicación y potencia de sonicación. Los puntos de optimización fueron 55 °C, 15 min, 120 W para ambas variedades de frijol y los t_{ha} fueron de 4.5 y 4.3 h para la variedad BIO101 y Nima-Calima respectivamente. Además, los t_{ha} obtenidos mediante la HCPU presentaron una reducción de 53% para la variedad BIO101 y 28% para la variedad Nima-Calima con respecto a los t_{ha} obtenidos por la HC. El uso del ultrasonido como pretratamiento en la hidratación del frijol mejoró los t_{ha} y podría ser un enfoque útil en la preparación doméstica e industrial del frijol común.

Palabras claves: frijol, hidratación, modelos matemáticos, metodología de superficie de respuesta.

Introducción

La hidratación o remojo es el paso más importante en las legumbres y cereales antes de llevar a cabo cualquier proceso de preparación como la cocción, la germinación, la fermentación, entre otros (Abbas & Ahmad, 2018). Esta es una etapa intermitente y conlleva gran demanda de tiempo, lo que puede ser un obstáculo en el procesamiento a escala doméstica, como industria (Gharibzahedi & Jafari, 2017).

La aplicación del ultrasonido es cada vez más común en la industria de alimentos, tanto para uso industrial, como investigativo. A su vez, el ultrasonido ha sido aplicado como pretratamiento en diferentes métodos de procesamiento como secado, congelación, extracción, entre otros (Xin et al., 2014; Xu et al., 2015; Fernandes et al., 2015; Fernandes et al., 2019; Ordóñez-Santos et al., 2022; Kaur et al., 2021). Además, la tecnología del ultrasonido se ha utilizado para acortar el t_{na} en algunos alimentos que por índole natural, deben hidratarse, esto se da principalmente en granos y cereales (Miano & Augusto, 2018a). También, en la industria alimentaria o en la cocina doméstica, son muchos los alimentos los cuales se les eliminan el contenido de humedad para aumentar el tiempo de vida útil. Luego, es necesaria una rehidratación, que mediante la aplicación del ultrasonido, no sólo disminuye el tiempo de rehidratación, sino que también ayuda a conservar las características nutricionales y sensoriales del alimento hidratado (Lee et al., 2023; Wang et al., 2023)

Dado que la implementación del ultrasonido como tecnología emergente ha ganado importancia en el campo de la ciencia, de la tecnología e industria, el objetivo de este capítulo está desarrollado en la implementación del ultrasonido como optimización en el proceso de hidratación convencional en dos variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris*).

4.1 Materiales y métodos

4.1.1 Geolocalización desarrollo del proyecto

Los ensayos experimentales se realizaron en el Laboratorio de Calidad Nutricional del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

4.1.2 Obtención, limpieza y conservación del material de estudio

El estudio se realizó con dos variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris*), una variedad biofortificada en minerales (hierro y zinc) y una variedad comercial. La variedad biofortificada BIO101, fue suministrada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), cosechada cerca de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca (03°50'N, 76°35'O: 1001 m.s.n.m.). La variedad comercial, Nima-Calima, fue adquirida en un establecimiento comercial de la ciudad de Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia y fue cosechada en la región del departamento de Antioquia, Colombia. Ambos materiales fueron sometidos a una limpieza rutinaria (eliminación de hojas, tallos, piedrillas, semillas en mal estado, insectos, entre otros). Posteriormente el material fue empacado en bolsas metalizadas de alta barrera, selladas al vacío y almacenadas en un cuarto frío a 4 °C con humedad relativa controlada de 40% hasta los ensayos de interés (Arcos & Rojas, 2018).

Figura 4-1. Variedades de frijol para el estudio (a) Frijol BIO101;(b) Frijol Nima-Calima.

(Autor)



a)



b)

4.1.3 Determinación de contenido de humedad inicial

La determinación del contenido de humedad se realizó como lo indica Nielsen (2010). Las semillas de frijol fueron homogenizadas en un molino de cuchillas de acero inoxidable (IKA, tube milling C5000, China) a 20000 rpm durante 48 s. Se pesó 2 g del material homogenizado en platos de aluminio y posteriormente se llevaron a un horno de secado (BINDER, model 9010-0164, USA) a una temperatura de 105 °C por 24 h. El porcentaje de humedad en base humedad fue calculado como lo indica la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad}_{bh} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (4.1)$$

Donde P_i es el peso inicial de la muestra húmeda y P_f es el peso final de la muestra seca.

4.1.4 Hidratación convencional (HC)

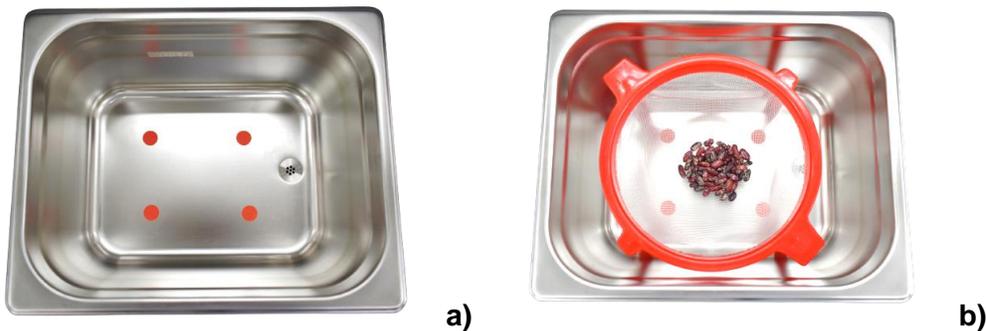
La HC se realizó como lo describe Beintema et al. (2018) modificado a escala de laboratorio manteniéndose la proporción peso a peso 1:4 (fríjol:agua). En un vaso de precipitado de 250 mL, se pesó 20 g de semillas de frijol y se agregó 80 mL de agua tipo 1 (resistividad máxima de 18.2 MΩ.cm) a 21.7°C de temperatura y se procedió a obtener los valores de porcentaje de humedad en intervalos de una hora como se indica en la metodología propuesta por López et al. (2017). Inicialmente, se tomó el peso de las semillas a hidratar y fueron colocadas en un vaso de precipitado con agua. Posteriormente, en cada intervalo de una hora de remojo, las semillas se removieron, se les drenó el agua de remojo, se secaron con papel toalla y gasa, y se pesaron. Una vez obtenido el peso de las semillas hidratadas en dicho intervalo, estas fueron devuelta al vaso de precipitado para continuar con el siguiente intervalo de hidratación. Este procedimiento se repitió hasta que la diferencia en el aumento del peso de las semillas entre intervalos no fuera mayor del 5%.

4.1.5 Hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido (HCPU)

La HCPU se realizó como lo describe Ghafoor et al. (2014), usando un baño ultrasonido (Ultrasonic cleanner, model BJUCPTH10, China) de 10 L de capacidad, con operación a 40 KHz y potencia gradual en un rango de 0-240 W. El baño ultrasonido se llenó con 6 L de agua tipo 1 a temperatura ambiente y se acondicionó el sistema de acuerdo con las condiciones de operabilidad (temperatura del medio de sonicación, tiempo de sonicación

y potencia de sonicación) fijadas para cada ensayo. Posteriormente, se procedió a sumergir 20 g de semillas de frijol reposando sobre una canastilla de cedazo plástico. Las semillas de frijol fueron posicionadas de tal manera que se ubicaran equidistantes de los 4 transductores ultrasónicos y se procedió a iniciar el proceso de sonicación (Figura 4-2).

Figura 4-2. Posición de las semillas en el ultrasonido (a) vista superior del baño ultrasonido. Los puntos rojos indican la posición de los cuatro transductores en el interior del tanque; (b). Vista superior del baño ultrasonido. La canastilla de cedazo permite mantener el material a una distancia equidistante a los transductores. (Autor)



En primer lugar, se exploró de manera univariada de acuerdo con el rango de operabilidad del ultrasonido, la región óptima experimental para cada una de las variables independientes de estudio a saber: temperatura del medio de sonicación (X_1 , °C), tiempo de sonicación (X_2 , min) y potencia de sonicación (X_3 , W). La exploración de los rangos de operabilidad del ultrasonido y obtención de la región óptima de operación se obtuvo manteniendo dos variables independientes con un valor de operabilidad constante, mientras que la tercera variable independiente se le asignó diferentes valores tal como se indicó en la tabla 4-1. El rango estudiado para la temperatura del medio de sonicación se realizó de acuerdo a los experimentos realizado por Ulloa et al., (2016), entre 21.7 °C (temperatura ambiente del lugar donde se realizaron los ensayos) y 50 °C. El intervalo de tiempo de sonicación estuvo acorde a las operaciones experimentales propuestas por López et al. (2017) entre 5-20 min, en donde también se tuvo en cuenta las indicaciones del proveedor del ultrasonido con respecto al tiempo de sonicación excesivo para evitar el daño de los transductores del instrumento. Los intervalos de potencia de sonicación estuvieron dentro del rango de potencia nominal (en valor porcentual) del ultrasonido aplicado por Ranjbari et al. (2013) entre 20-80 % de la potencia nominal total del ultrasonido (100%=240 W).

Tabla 4-1. Exploración de región de operabilidad para cada una de las variables independientes del estudio

No. experimento exploratorio	Temperatura del medio de sonicación (°C)	Tiempo de sonicación (min)	Potencia sonicación (W)
10	21.7	10	96
4	35	10	96
7	45	10	96
3	50	10	96
1	35	5	96
8	35	15	96
2	35	20	96
5	35	10	48
6	35	10	144
9	35	10	192

Una vez culminado el pretratamiento con ultrasonido, las semillas de frijol fueron removidas del baño, para luego ser drenadas y secadas con una toalla de papel y gasa, para tomar el peso de agua absorbida en el pretratamiento con ultrasonido. Seguido, las semillas fueron trasladadas a un vaso de precipitado y se continuo el proceso de hidratación como en el numeral 4.1.4. Concluido los experimentos de exploración univariada, se calculó el valor de la variable de respuesta (t_{ha}) para ambas variedades en estudio.

4.1.6 Cálculo de valor de variable de respuesta

Se evaluaron los modelos matemáticos expuestos anteriormente (modelo de Kaptso, modelo de Peleg, modelo de primer orden, modelo de Weibull y modelo de Fick) seleccionándose el modelo que presentó el mejor ajuste a los datos de hidratación obtenidos. Para ello se fijaron los parámetros estadísticos como el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), el valor de la suma de cuadrados residuales (RSS) y el valor del error cuadrático medio (RMSE) (Miano & Augusto, 2015;Ghafoor et al., 2014). Una vez seleccionado el mejor modelo matemático, se procedió a encontrar el valor de la variable de respuesta (t_{ha}) en el que las semillas lograron alcanzar el 53% de humedad, el cuál corresponde al porcentaje de humedad mínimo aceptado para considerarse de que la mayoría de las semillas de frijol están en un estado de hidratación aceptable (Howard et al., 2018). Para ello se utilizó el programa de computación estadística y de gráficos R-project versión 4.2.2, activando los paquetes básicos Stats y The R basic package. Se introdujo él código de programación que corresponde a la ecuación del modelo matemático

y posteriormente, mediante el comando “round”, se generaron 2 millones de valores de tiempo de hidratación que correspondían entre el 52-54% de hidratación. Finalmente, mediante el comando “which”, se realizó la búsqueda del tiempo de hidratación que le correspondía al porcentaje de hidratación del 53%.

4.1.7 Optimización del proceso de HCPU y análisis de la superficie de respuesta

Una vez obtenida la región óptima a partir de los datos de exploración, se realizó la optimización de la HCPU mediante la MSR aplicando un diseño central compuesto rotacional (DCCR) de tres factores a tres niveles con 17 corridas (3 puntos centrales, 8 puntos factoriales y 6 puntos axiales con valor de $\alpha=1.68$). La Tabla 4-2 muestra los factores codificados para los puntos centrales, factoriales y axiales, según factor de estudio.

Tabla 4-2. Codificación de factores para los puntos que componen el DCCR

Factor	- α	-1	0	+1	+ α
Temperatura del medio de sonicación (°C)	41.6	45	50	55	58.4
Tiempo de sonicación(min)	1.7	5	10	15	18.4
Potencia sonicación (W)	55.7	72	96	120	136.2

4.1.8 Análisis estadístico

Las variables independientes de estudio fueron la temperatura del medio de sonicación (X_1 , °C), tiempo de sonicación (X_2 , min) y la potencia de sonicación (X_3 , W). Mediante una ecuación de segundo orden (ecuación 4.2) en donde se incluía los términos independientes y de interacción, se estimó las condiciones óptimas para la HCPU.

$$Y_i = \beta_0 + \sum_i^n \beta_i X_i + \sum_i^n \sum_j^n \beta_{ij} X_i X_j + \sum_i^n \beta_{ii} X_i^2 \quad (4.2)$$

Con Y_i la variable de respuesta, β_0 es una constante, β_i es considerado el coeficiente de la i -ésima variable de la regresión lineal, β_{ij} es considerado el coeficiente de la interacción entre la i -ésima y j -ésima variable de la regresión lineal y X_i denotan la i -ésima variable independiente. Para la estimación del efecto de los factores sobre la variable de respuesta, se aplicó una prueba ANOVA ($p < 0.05$). El ajuste del modelo se evaluó bajo los parámetros estadísticos de coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y el coeficiente de la falta de ajuste (Lack of Fit). Para ello se utilizó el programa de computación estadística y de gráficos

R-project versión 4.2.2 y los paquetes de datos nls2 (non-linear squares 2) versión 0.2 y agricolae versión 1.3-3. La validación de las condiciones óptimas encontradas de sonicación, se realizaron mediante una prueba-t de dos colas a un nivel de significancia de 0.025, usando el paquete básico “stats” del mismo programa estadístico, anteriormente mencionado.

4.2 Resultados y discusión

4.2.1 Contenido de humedad inicial

La variedad BIO101 presentó un porcentaje de humedad inicial (en base seca) de 11.72%, mientras que la variedad Nima-Calima presentó un porcentaje de 15.18%. Los porcentajes de humedad obtenidos son similares a los reportados en la literatura científica. Inicialmente, el contenido de humedad en las semillas de frijol se encuentran en una humedad entre el 12-16% (Howard et al., 2018). Sathe. (2015), reportó los porcentajes de humedad en diferentes variedades de frijol común como el frijol blanco, frijol pinto, frijol riñón rosado y frijol riñón marrón con valores porcentuales de 9.4-18.2%, 9.1-14.7%, 10.5% y 13.2% respectivamente. Sin embargo, algunas entidades encargadas en el manejo de la producción y poscosecha de frijol común, recomiendan que el secado final deberá tener una humedad menor al 14% para conservar evitar las pérdidas durante el almacenamiento debido a la proliferación de microorganismos y minimizar los ataques por insectos (Arcos & Rojas, 2018).

4.2.2 Análisis de resultados de la hidratación convencional (HC)

Los resultados obtenidos en la hidratación convencional mostraron que ambas variedades presentaron cinéticas con características de tipo sigmoideal. El mismo comportamiento de hidratación fue observado en otras investigaciones con las variedades de frijol pinto (Kinyanjui et al., 2015) y frijol blanco (Miano, Sabadoti, Pereira, et al., 2018). El comportamiento inicial en la hidratación del frijol común se le ha atribuido a algunas características estructurales de la semilla como el micropilo y el hilio, ya que el área del surco del micropilo presenta una relación con la fase de retraso o lenta de hidratación (lag phase), mientras que el tamaño del hilio está más ligado al comportamiento general de la absorción de agua (Gargiulo et al., 2020). También, el contenido de humedad inicial en la semilla puede influir en el comportamiento que tendrá en la hidratación, ya que la

permeabilidad de la testa de la semilla aumenta con el incremento del contenido de agua dentro de la semilla (Miano & Augusto, 2018a).

En cuanto al modelo matemático que mejor se ajustó a los datos obtenidos para la HC, tanto para la variedad BIO101, como para la variedad Nima-Calima fue el modelo de Weibull. Esto es debido a que el modelo de Weibull normalmente presenta un buen ajuste para las curvas de hidratación tanto cóncavas y sigmoidales en los comportamientos cinéticos de hidratación propios de las leguminosas (Gargiulo et al., 2020). Además, al ser un modelo matemático descrito con dos parámetros (α y β) exhibe un buen ajuste a los datos de hidratación y una baja desviación de los valores residuales, ya que cuando el parámetro β tiende a 1, la parte de la curva de la cinética de hidratación en la región que representa la fase inicial (fase-I) toma la forma de una hidratación cóncava hacia abajo, mientras que cuando los valores son mayores a 1, la curva toma forma típica de una hidratación sigmoidal. Por otra parte, el parámetro α está más ligado a la descripción de la región de la curva que representa la fase-II y la velocidad del proceso de hidratación en general (Machado et al., 1999). Los valores de parametrización obtenidos para cada uno de los modelos y posterior selección del modelo de mejor ajuste se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Valores paramétricos de cada modelo matemático de acuerdo con los datos de la HC para ambas variedades.

variedad	modelo	R ²	RSS*	RMSE**
BIO101	Kapso	0.995	11.2	1.01
	Peleg	0.956	109	3.15
	Orden 1	0.961	97.5	2.97
	Weibull	0.996	9.97	0.95
	Fick	0.591	1008	9.57
Nima-Calima	Kapso	0.996	8.53	0.86
	Peleg	0.951	106	3.10
	Orden 1	0.970	65.7	2.43
	Weibull	0.998	3.89	0.58
	Fick	0.706	638	7.62

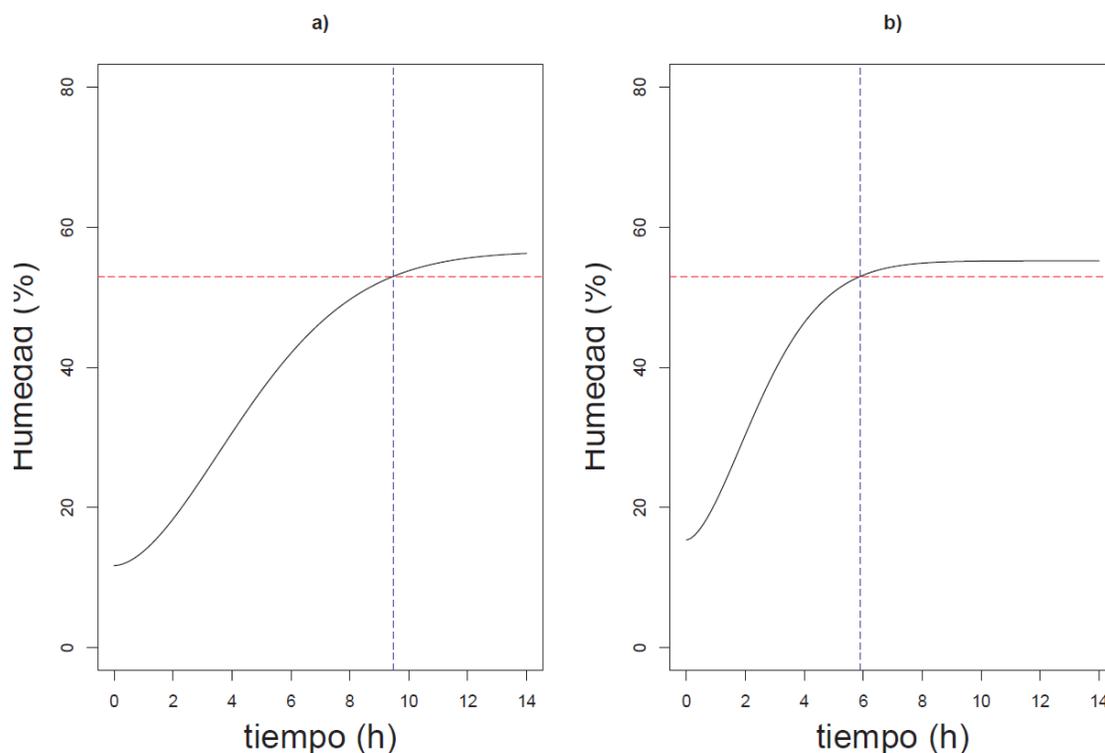
*suma de cuadrados residuales

**error cuadrático medio

La presentación gráfica de la cinética de hidratación convencional para cada una de las variedades se puede observar en la figura 4-3. La línea horizontal entrecortada (rojo) en cada gráfico, demarca el porcentaje de hidratación óptimo de las semillas (53%), mientras

que la línea vertical entrecortada (azul), denota el tiempo necesario para alcanzar dicho porcentaje de hidratación.

Figura 4-3. Representación del mejor modelo ajustado a los valores de hidratación obtenido (a) Modelo de Weibull para describir la cinética de hidratación del frijol BIO101; (b). Modelo de Weibull para describir la cinética de hidratación del frijol Nima-Calima.



El t_{ha} para alcanzar un porcentaje de 53% de humedad para la variedad BIO101 fue de 9.5 ± 0.5 h, mientras que para la variedad Nima-Calima fue de 6.0 ± 1.1 h. Inicialmente, ambas variedades presentaron una fase de retraso (lag-phase), la cual es una característica común en las semillas de frijol con cubiertas muy impermeables, puesto que la hidratación inicial solo se da por el hilio. Sin embargo, una vez superada la fase de retraso, se observa que la variedad Nima-Calima tiene una tasa de hidratación mucho más rápida que la variedad BIO101. Este comportamiento de hidratación diferente entre variedades se le atribuye a las propiedades intrínsecas de cada variedad, como la composición química del almidón, proteína, grasa y minerales, las cuales están correlacionadas con la hidratación, como también a la energía necesaria para perforar la cubierta del grano, la cual tiene una correlación negativa con respecto a la tasa de hidratación (Miano, Sabadoti, Pereira, et al., 2018).

4.2.3 Análisis de resultados del rango de operabilidad y región óptima experimental para la hidratación convencional con pretratamiento de ultrasonido (HCPU)

En la tabla 4.4 se muestra el modelo que mejor se ajustó a los datos obtenidos en el estudio de la hidratación para la variedad BIO101, según las condiciones de operabilidad del ultrasonido. Igualmente, la tabla 4-5 corresponde a los análisis estadísticos obtenidos para las condiciones de operabilidad para la variedad Nima-Calima.

Tabla 4-4. Condiciones de operabilidad y modelo de mejor ajuste a los valores de t_{ha} obtenidos en la variedad BIO101.

Condiciones de operación del ultrasonido			Mejor modelo matemático calculado	R ²	RSS	RMSE	Tiempo de hidratación adecuado t_{ha} (53% $H_{b,h}$)
Temperatura (°C)	tiempo (min)	Potencia (W)					
35	10	96	Weibull	0.9895	6.8709	1.5741	8.6
35	10	48	Weibull	0.9972	27.2567	0.8289	10.2
35	10	144	Weibull	0.9921	25.1263	1.4499	7.5
35	10	192	Weibull	0.9941	18.0586	1.2813	7.6
20	10	96	Weibull	0.9924	20.8829	1.4451	7.7
50	10	96	Kapso	0.9941	12.6818	1.3032	5.0
45	10	96	Weibull	0.9941	16.8762	1.2991	7.4
35	5	96	Kapso	0.9918	23.2898	1.4551	9.7
35	15	96	Weibull	0.9941	15.0190	1.2255	8.3
35	20	96	Weibull	0.9865	39.2098	1.8880	7.8

H_{b,h}. Humedad en base húmeda

Tabla 4-5. Condiciones de operabilidad y modelo de mejor ajuste a los valores de t_{ha} obtenidos en la variedad Nima-Calima

Condiciones de operación del ultrasonido			Mejor modelo matemático o calculado	R ²	RSS	RMSE	Tiempo de hidratación adecuado t_{ha} (53% $H_{b,h}$)
Temperatura (°C)	tiempo (min)	Potencia (W)					
35	10	48	Weibull	0.9993	1.5339	0.3916	4.8
35	10	96	Weibull	0.9998	0.4061	0.2253	6.6
35	10	144	Kapso	0.9995	0.9771	0.3295	5.0
35	10	192	Weibull	0.9990	1.9524	0.4658	5.2
20	10	96	Weibull	0.9992	1.8862	0.4343	4.9
50	10	96	Kapso	0.9973	6.0521	0.7780	4.7
45	10	96	Kapso	0.9995	1.0697	0.3271	5.1
35	5	96	Weibull	0.9995	1.1236	0.3352	5.1
35	15	96	Weibull	0.9985	3.3390	0.5778	7.0
35	20	96	Weibull	0.9985	4.0422	0.6062	6.0

H_{b,h}. Humedad en base húmeda

Los resultados obtenidos en la exploración univariada, muestran que tanto para la variedad BIO101, como para la variedad Nima-Calima se obtuvieron los valores de 50 °C, 10 min y 96 W como condiciones de operación en donde el t_{ha} fue mínimo para alcanzar una humedad de 53% $H_{b,h.}$. Para la variedad BIO101, los modelos que mejor se ajustaron a las diferentes condiciones de operación estudiadas fue el modelo de Weibull y el modelo de Kaptso. Sin embargo, para las condiciones óptimas de operación donde se obtuvo el menor valor de t_{ha} (5.0 h), fue el modelo de Kaptso ($R^2=0.9941$, $RSS=12.6818$ y $RMSE=0.7780$). Cabe indicar que el modelo de Weibull evaluado para estas condiciones presentó un valor paramétrico de $R^2=0.9856$, $RSS=45.88$ y $RMSE=2.04$. Para la variedad Nima-Calima, las diferentes condiciones de operación y los datos de hidratación obtenidos fueron igualmente representadas por los modelos matemáticos de Weibull y de Kaptso. Además, las condiciones de operación en donde se obtuvo el menor valor de t_{ha} (4.7 h), el modelo de kaptso ($R^2=0.9973$, $RSS=6.0521$ y $RMSE=0.7780$), fue nuevamente el modelo que mejor se ajustó a los datos obtenidos, seguido una vez más por el modelo de Weibull el cual obtuvo valores paramétricos de $R^2=0.9963$, $RSS=8.36$ y $RMSE=0.91$. El modelo de Kaptso, también es un modelo matemático que logra ajustarse a los comportamientos de hidratación sigmoideal, debido a que los parámetros que componen el modelo, logran describir con precisión la rata de hidratación y la fase de retraso (Miano & Augusto, 2018a). Por lo que, debido a su naturaleza matemática de ambos modelos y sus dos constantes paramétricas, hace que estos dos modelos logren explicar los datos de hidratación obtenidos con respecto a la cinética de hidratación de las variedades estudiadas. A continuación, se muestra gráficamente los valores obtenidos del t_{ha} , de acuerdo a las condiciones de operabilidad del ultrasonido (Figura 4-4 y Figura 4-5).

Figura 4-4. Resultados exploratorios para la variedad BIO101.(a) (X_1 , °C) es la variable explorada. X_2 y X_3 son constantes (10 min y 96 W); (b). (X_2 , min) es la variable explorada. X_1 y X_3 , son constantes (35 °C y 96 W); (c). (X_3 , W) es la variable explorada. X_1 y X_2 , son constantes (35 °C y 10 min)

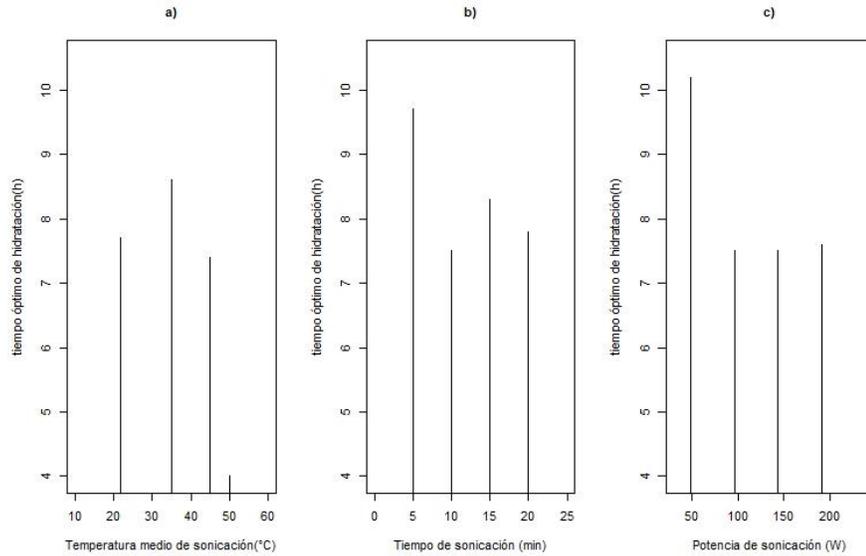
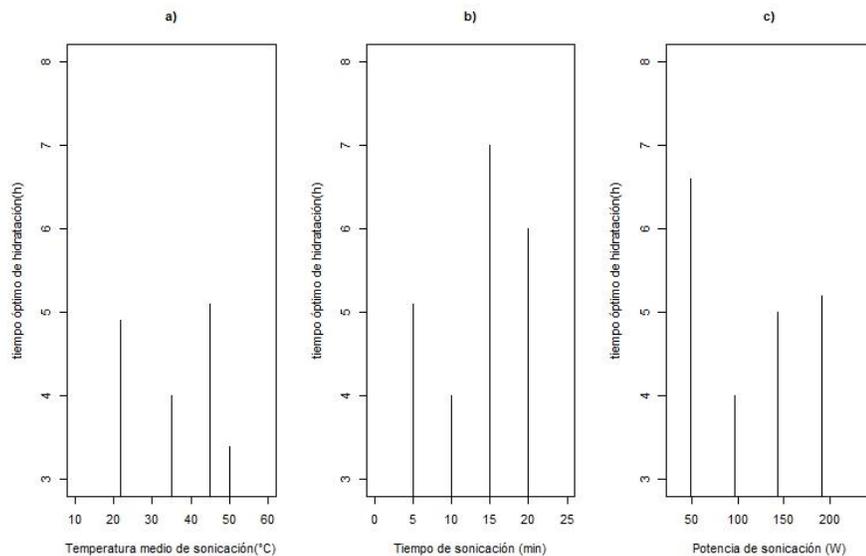


Figura 4-5. Resultados exploratorios para la variedad Nima-Calima.(a) (X_1 , °C) es la variable explorada. X_2 y X_3 son constantes (10 min y 96 W) (b). (X_2 , min) es la variable explorada. X_1 y X_3 , son constantes (35 °C y 96 W) (c). (X_3 , W) es la variable explorada. X_1 y X_2 , son constantes (35 °C y 10 min)



4.2.4 Análisis y resultados de la optimización del proceso de hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido (HCPU) y metodología de superficie de respuesta (MSR)

Los modelos matemáticos que mejor explicaron la cinética de hidratación en cada uno de las combinaciones de las variables, fue el modelo de Weibull y el modelo de Kaptso. La Tabla 4-6 y Tabla 4-7 muestran la matriz de DCCR y el modelo matemático que mejor se ajustó a la cinética de hidratación de cada uno de los tratamientos realizados, según las condiciones de operación para la variedad BIO101 y la variedad Nima-Calima. Los modelos obtenidos concuerdan con los modelos reportados por López et al. (2017). Los autores estudiaron la cinética de hidratación en seis variedades de frijol (azufrado, mayacoba, pinto, peruano bola, flor de mayo y negro jamapa) las cuales fueron remojadas en agua destilada a 30 °C y sonicadas a diferentes niveles de potencia de ultrasonido 5, 12 y 19 W (20 kHz), reportando que entre los modelos sigmoidal (Kaptso), primer orden, Peleg y Weibull, el modelo que mejor se ajustó a la cinética de hidratación fue el modelo de Weibull con un R^2 entre 0.986-0.999, seguido del modelo sigmoidal (Kaptso) con un R^2 entre 0.961-0.998. En la tabla 4-6 y 4-7 también se reportan los valores de la variable de respuesta (t_{ha}) que tomó cada tratamiento para que las semillas de frijol alcanzaran el porcentaje de humedad (en base húmeda) óptimo (53 %). Para la variedad BIO101, se obtuvieron valores de t_{ha} en un rango entre 4.6-6.7 h, presentado una reducción en los entre 29 y 52%, mientras que para la variedad Nima-Calima se obtuvieron valores de t_{ha} en un rango entre 4.0-6.9 h, obteniéndose una reducción en el tiempo de hidratación adecuado entre -15 y 33%. Autores como Miano, Pereira, et al. (2016), han reportado reducciones porcentuales en el tiempo de hidratación similares a los intervalos obtenidos en esta investigación. Los autores estudiaron el efecto del ultrasonido en la hidratación del frijol mungo (*Vigna radiata*) y encontraron una reducción del 25% del tiempo para que las semillas alcanzaran el equilibrio de la hidratación con respecto a la hidratación control (sin ultrasonido).

Tabla 4-6. Matriz del DCCR para la variedad BIO101 con su respectivo valor obtenido de tiempo de hidratación adecuado para cada tratamiento.

Corrida	tratamiento	Mejor modelo matemático	Factor X ₁ Temperatura medio sonicación (°C)	Factor X ₂ tiempo sonicación (min)	Factor X ₃ potencia sonicación (W)	Tiempo hidratación adecuado (h)
11	1	Weibull	-1	-1	-1	6.0
15	2	Weibull	-1	1	-1	6.7
16	3	Weibull	-1	-1	1	5.7
9	4	Kaptsó	1	1	-1	5.8
7	5	Kaptsó	1	-1	-1	6.7
6	6	Kaptsó	1	-1	1	5.6
8	7	Weibull	1	1	1	4.6
17	8	Kaptsó	-1.67	0	0	6.6
14	9	Kaptsó	-1	1	1	6.0
10	10	Weibull	0	0	0	5.8
2	11	Kaptsó	0	0	0	6.1
3	12	Kaptsó	0	0	0	5.1
12	13	Weibull	0	-1.67	0	6.2
4	14	Kaptsó	1.67	0	0	5.2
1	15	Kaptsó	0	1.67	0	5.4
13	16	Kaptsó	0	0	-1.67	6.0
5	17	Kaptsó	0	0	1.67	5.2

Tabla 4-7. Matriz del DCCR para la variedad Nima-Calima con su respectivo valor obtenido de tiempo de hidratación adecuado para cada tratamiento

Corrida	tratamiento	Mejor modelo matemático	Factor X ₁ Temperatura medio sonicación (°C)	Factor X ₂ tiempo sonicación (min)	Factor X ₃ potencia sonicación (W)	Tiempo hidratación adecuado (h)
7	1	Weibull	-1	-1	-1	6.6
3	2	Kaptsó	-1	1	-1	5.6
4	3	Kaptsó	-1	-1	1	6.8
9	4	Kaptsó	-1	1	1	5.2
6	5	Weibull	1	-1	-1	6.1
15	6	Weibull	1	1	-1	4.4
8	7	Weibull	1	-1	1	5.4
5	8	Weibull	1	1	1	4.0
14	9	Weibull	0	0	0	6.1
12	10	Kaptsó	0	0	0	5.1
16	11	Weibull	0	0	0	4.5
11	12	Weibull	0	-1.7	0	6.9
1	13	Weibull	0	1.7	0	5.7
17	14	Weibull	0	0	-1.7	6.8
10	15	Kaptsó	-1.7	0	0	6.3
2	16	Kaptsó	0	0	1.7	5.5
13	17	Weibull	1.7	0	0	4.4

El análisis de varianza (ANOVA) para la variedad BIO101 se presenta en la tabla 4-8. El factor temperatura del medio de sonicación (X_1) y el factor tiempo de sonicación (X_2) presentaron un efecto significativo en la hidratación ($p < 0.05$), aunque este último en menor magnitud con respecto a los otros factores en estudio. Sin embargo, el factor que presentó mayor efecto significativo en la hidratación fue el factor potencia de sonicación (X_3) ($p < 0.05$). Los factores cuadráticos puros y los factores de interacción no presentaron un efecto significativo en el proceso de hidratación en la variedad BIO101 ($p > 0.05$), a excepción de la interacción X_1X_2 ($p < 0.05$). El parámetro de falta de ajuste para esta variedad fue no significativo ($p > 0.05$) y la determinación de los coeficientes de regresión del modelo fue de $R^2 = 0.9187$ y $R^2_{adj} = 0.8141$. Por otro lado, el análisis de varianza (ANOVA) para la variedad Nima-Calima se presenta en la tabla 4-9. El factor temperatura del medio de sonicación fue el factor de mayor efecto significativo en la hidratación ($p < 0.05$), contrario al factor tiempo de sonicación, el cual no presentó efectos significativos ($p > 0.05$). Sin embargo, el factor potencia de sonicación presentó un efecto significativo, aunque de menor proporción, en comparación al factor de temperatura de sonicación. Los factores cuadráticos puros de temperatura de sonicación y tiempo de sonicación presentaron un valor de significancia en la contribución del efecto sobre el proceso de hidratación. Contrario a los factores de interacción, en los que ninguno de ellos presentó efectos significativos ($p > 0.05$). Al igual que la variedad BIO101, el parámetro de falta de ajuste para la variedad Nima-Calima fue no significativo ($p > 0.05$) y los coeficientes de regresión del modelo fueron $R^2 = 0.8846$ y $R^2_{adj} = 0.7362$.

Tabla 4-8. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo ajustado polinomial cuadrático en la variedad BIO101

	Estimate	STD.Error	t- value	Pr(> t)	
Intercepto	5.924578	0.138335	42.8279	9.88E-10	***
x1(Temperatura)	-0.296963	0.065001	-4.5686	0.002578	**
x2(tiempo)	-0.164458	0.065001	-2.5301	0.039228	*
x3(potencia)	-0.340349	0.065001	-5.2361	0.001204	**
x1 ²	0.01749	0.07161	0.2442	0.814048	NS
X2 ²	-0.017941	0.07161	-0.2505	0.809371	NS
X3 ²	-0.088802	0.07161	-1.2401	0.2549	NS
x1x2	-0.3625	0.08489	-4.2702	0.0037	**
x1x3	-0.1625	0.08489	-1.9142	0.09711	NS
X2x3	-0.0625	0.08489	-0.7362	0.485518	NS

(Continúa)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Residuals	7	0.40356	0.05765		
Lack of fit	5	0.35689	0.07138	3.0591	0.264513
Pure error	2	0.04667	0.02333		

R²=0.9187; R² adj=0.8141: ***extremadamente significativo (p<0), ** medianamente significativo (p<0.001), * normalmente significativo (p<0.05), NS (no significativo)

Tabla 4-9. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo ajustado polinomial cuadrático en la variedad Nima-Calima

	Estimate	STD.Error	t- value	Pr(> t)	
Intercepto	4.83281	0.2768	17.4596	4.98E-07	***
x1(Temperatura)	-0.56549	0.130064	-4.3478	0.003364	**
x2(tiempo)	-0.156836	0.130064	-1.2058	0.26705	NS
x3(potencia)	-0.450575	0.130064	-3.4643	0.010487	*
x1²	0.421654	0.143288	2.9427	0.02163	*
X2²	0.510231	0.143288	3.5609	0.009209	**
X3²	-0.056663	0.143288	-0.3954	0.704289	NS
x1x2	-0.0375	0.169861	-0.2208	0.831574	NS
x1x3	-0.0625	0.169861	-0.3679	0.723787	NS
X2x3	-0.1125	0.169861	-0.6623	0.52897	

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Residuals	7	1.6158	0.23082		
Lack of fit	5	1.4358	0.28715	3.1906	0.255675
Pure error	2	0.18	0.09		

R²=0.8846; R² adj=0.7362: ***extremadamente significativo (p<0), ** medianamente significativo (p<0.001), * normalmente significativo (p<0.05), NS (no significativo)

La figura 4-6 muestra el efecto de los factores sobre el t_{ha} en la variedad BIO101. En la figura 4-6 a, se observa que la temperatura y la potencia influyeron en el t_{ha} y que este disminuye conforme se incrementan ambos factores. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por López et al. (2017), cuyos estudios se basaron en el efecto de la temperatura y la sonicación sobre la hidratación de seis variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris L*). Estos investigadores encontraron una reducción entre 55.6-77.2% en el tiempo de hidratación cuando los frijoles fueron remojados a 30 °C y sonicados a 5, 12 y 19 W con respecto a la hidratación control (22°C, sin sonicación). En la figura 4.6 b, la temperatura del medio de sonicación y el tiempo de sonicación influyeron en el t_{ha} , cuyo incremento en las dos variables independientes, significó una reducción en la variable de respuesta (t_{ha}). En la figura 4-6 c, el tiempo y la potencia influyeron inversamente proporcional en la variable de respuesta al incremento de los factores, reduciendo el tiempo óptimo de hidratación. Comportamientos análogos han sido reportados por Ulloa et

al.(2015). Los autores analizaron la influencia que tenía la sonicación con respecto al tiempo de sonicación en la hidratación de seis variedades de frijol. Los autores encontraron que el valor del coeficiente de difusión aumentaba conforme aumentaba el tiempo de exposición a la sonicación, minimizando el tiempo para alcanzar el equilibrio de absorción de agua en las semillas, lográndose disminuir el tiempo de hidratación entre 17.6 y 58.8%, según fuera la variedad de frijol estudiada.

La figura 4-7 a, muestra los factores y sus efectos en el t_{ha} para la variedad Nima-Calima. La respuesta del t_{ha} presentó un punto de inflexión cercano a una temperatura del medio de sonicación de 55 °C, mientras que el efecto del tiempo de ultrasonido pudo estar relacionado con la temperatura del medio de sonicación. Algunos autores han reportado comportamientos similares en donde la interacción entre estos dos factores puede mejorar o afectar la hidratación, según sea las condiciones de operación. Patero & Augusto. (2015), estudiaron el efecto de ultrasonido en la hidratación del sorgo (*Sorghum bicolor*) a diferentes temperaturas (entre 25 y 53 °C) encontrando que el ultrasonido no presentó un cambio significativo en la hidratación del sorgo a temperaturas elevadas. Además, relacionaron que este tipo de anomalías en la hidratación estaba ligado a que las cavitaciones generadas por las ondas ultrasónicas no siempre tienen el mismo efecto en todos los alimentos. En la figura 4-7 b, la temperatura del medio de sonicación y el tiempo de sonicación tuvieron una influencia significativa, presentando un punto mínimo del t_{ha} en la región próxima a los 55°C y 10 minutos. En la figura 4-7 c, el tiempo de sonicación presentó un punto de inflexión cercano a los 12 minutos mientras que la potencia influyó en la disminución del t_{ha} conforme esta se incrementaba. Esto se puede explicar que a medida que aumenta el tiempo de contacto del agua con la semilla, aumenta gradualmente la actividad del agua dentro de esta, mejorando el efecto de ultrasonido mediante la cavitación (Miano & Augusto, 2018b). El fenómeno de cavitación es más marcado cuando el alimento tiene una alta actividad de agua, ya que facilita la formación de microcanales generando una vía más rápida en el proceso de hidratación (Miano, Ibarz, et al., 2016b). Sin embargo, al igual que lo discutido entre la interacción del factor temperatura con el factor potencia para esta variedad de frijol, el factor potencia tiene el mismo comportamiento frente al factor tiempo, en donde el efecto máximo de ultrasonido se alcanza a un determinado valor de potencia, y de ahí en más, a potencias superiores, los cambios en la cinética de hidratación serían insignificantes con respecto al tiempo (Vásquez et al., 2021).

Figura 4-6. Efecto de la temperatura del medio de sonicación, tiempo de sonicación, y potencia de sonicación en la hidratación del frijol BIO101. (a) Superficie de respuesta temperatura medio sonicación-potencia de sonicación; (b) temperatura medio sonicación-tiempo de sonicación; (c), tiempo de sonicación- potencia de sonicación.

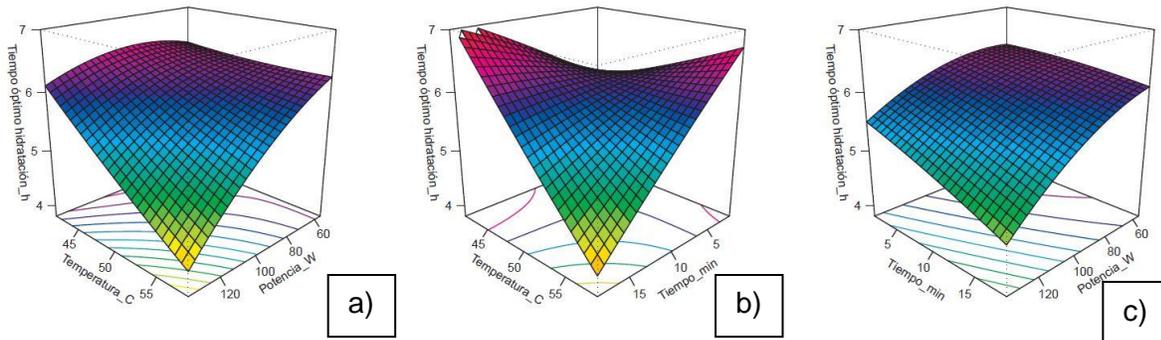
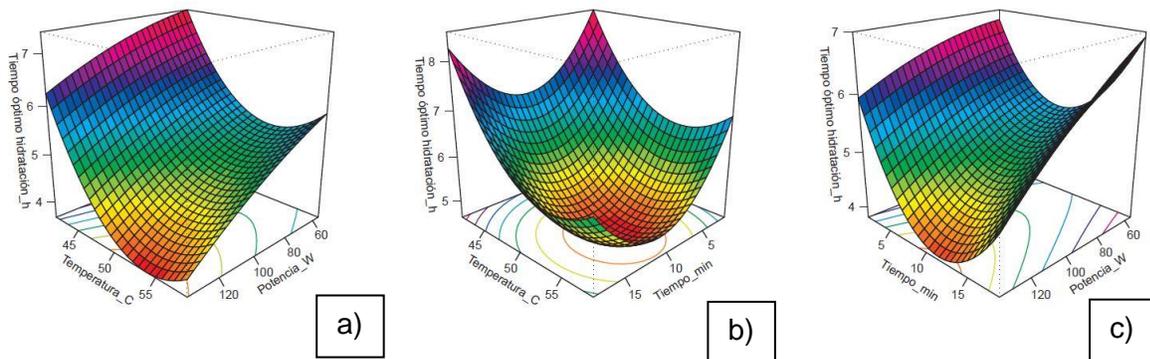


Figura 4-7. Efecto de la temperatura del medio de sonicación, tiempo de sonicación, y potencia de sonicación en la hidratación del frijol Nima-Calima. (a) Superficie de respuesta temperatura medio sonicación-potencia de sonicación; (b) temperatura medio sonicación-tiempo de sonicación; (c) tiempo de sonicación- potencia de sonicación.



A partir de cada modelo matemático obtenido en el análisis de MSR para la variedad BIO101, se obtuvo un punto óptimo global de 4.45 h (temperatura medio de sonicación 55 °C, tiempo de sonicación 15 min, potencia sonicación 120 W). Se realizaron 3 ensayos para validar el punto óptimo global obteniéndose valores de tiempo de hidratación adecuado de 4.43, 4.46 y 4.29 horas. Mediante una prueba t-student de dos colas los valores obtenidos no presentaron diferencias significativas con respecto al valor del punto óptimo global ($p > 0.025$). El modelo matemático que mejor describió cada una de las

cinéticas de hidratación fue el modelo de Weibull (Tabla 4-10). De la misma manera, mediante el modelo matemático obtenido en el análisis de MSR para la variedad Nima-Calima, el punto óptimo global fue de 4.32 h (temperatura medio de sonicación 55 °C, tiempo de sonicación 15 min, potencia sonicación 120 W). Los valores obtenidos en la validación para este óptimo global fueron de 4.30, 4.40 y 4.39 horas. Los valores no difirieron significativamente del valor del punto óptimo global ($p > 0.025$). La tabla 4-9 muestra un resumen de los t_{ha} obtenidos para ambos tratamientos en las dos variedades de frijol estudiadas. Igualmente, la tabla 4-11 los valores paramétricos obtenidos para cada modelo matemático evaluado.

Tabla 4-10. Valores de t_{ha} obtenidos según sea el tratamiento de hidratación realizado.

	BIO101			Nima-Calima		
	HC	HCPU	ANOVA	HC	HCPU	ANOVA
Tiempo de hidratación (h)	9.5±0.5 ^a	4.5±0.1b	***	6.0±1.1 ^a	4.3±0.2 ^b	**

(*) significativo $p < 0.05$; (**) significativo $p < 0.01$; (***) significativo $p < 0.001$; NS no hay diferencia significativa ($p > 0.05$); (^{a-b-c}) Medias dentro de las filas con letras diferentes, son significativamente diferentes ($p > 0.05$); HC= hidratación convencional; HCPU= hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido.

Tabla 4-11. Valores paramétricos de cada modelo matemático de acuerdo con los datos de la HCPU en el óptimo global (temperatura sonicación 55 °C, tiempo de sonicación 15 min, potencia sonicación 120 W) para ambas variedades

variedad	Modelo	R ²	RSS*	RMSE**
BIO101	Kaptso	0.998	3.87	0.69
	Peleg	0.973	58.3	2.70
	Orden 1	0.982	36.4	1.82
	Weibull	0.999	2.89	0.60
	Fick	0.879	248	4.75
Nima-Calima	Kaptso	0.989	21.7	1.40
	Peleg	0.993	12.9	1.08
	Orden 1	0.997	5.93	0.73
	Weibull	0.999	0.89	0.28
	Fick	0.706	638	7.62

4.3 Conclusiones

El uso del ultrasonido como tecnología emergente implementada en los procesos de hidratación convencionales del frijol común, mejoraron los t_{ha} en ambas variedades estudiadas. Aplicando las condiciones óptimas de hidratación encontradas, se logró

disminuir el t_{na} entre el 28-53%, con respecto a la hidratación convencional. Además, los factores que mayor efecto tuvieron sobre la hidratación fue la temperatura del medio de remojo, seguido de la potencia del medio de sonicación. Los modelos matemáticos de Kaptso y Weibull, fueron los modelos que mejor se ajustaron a las cinéticas de hidratación obtenidas.

4.4 Bibliografía

- Abbas, Y., & Ahmad, A. (2018). Impact of processing on nutritional and antinutritional factors of legumes: A review. *Annal. Food Science and Technology*, 19(2), 199–215. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2433>
- Arcos, J., & Rojas, D. C. (2018). *RECOMENDACIONES para la producción de grano de FRÍJOL BIOFORTIFICADO en Colombia*.
- Beintema, J. J. S., Gallego-Castillo, S., Londoño-Hernandez, L. F., Restrepo-Manjarres, J., & Talsma, E. F. (2018). Scaling-up biofortified beans high in iron and zinc through the school-feeding program: A sensory acceptance study with schoolchildren from two departments in southwest Colombia. *Food Science and Nutrition*, 6(4), 1138–1145. <https://doi.org/10.1002/fsn3.632>
- Fernandes, F. A. N., Braga, T. R., Silva, E. O., & Rodrigues, S. (2019). Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L.): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1793–1800. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03622-y>
- Fernandes, F. A. N., Rodrigues, S., Cárcel, J. A., & García-Pérez, J. V. (2015). Ultrasound-Assisted Air-Drying of Apple (*Malus domestica* L.) and Its Effects on the Vitamin of the Dried Product. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1503–1511. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1519-7>
- Gargiulo, L., Sorrentino, G., & Mele, G. (2020). 3D imaging of bean seeds: Correlations between hilum region structures and hydration kinetics. *Food Research International*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109211>
- Ghafoor, M., Misra, N. N., Mahadevan, K., & Tiwari, B. K. (2014). Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(1), 409–414. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.05.016>
- Gharibzahedi, S. M. T., & Jafari, S. M. (2017). The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. *Trends in Food Science and Technology*, 62, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.017>
- Howard, L. R., White, B. L., Uebersax, M. A., & Siddiq, M. (2018). Dry beans processing, quality evaluation, and nutrition. *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing: Second Edition*, 2–2, 559–587. <https://doi.org/10.1002/9781119098935.ch24>
- Kaur, S., Panesar, P. S., & Chopra, H. K. (2021). Standardization of ultrasound-assisted

- extraction of bioactive compounds from kinnow mandarin peel. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01674-9>
- Kinyanjui, P. K., Njoroge, D. M., Makokha, A. O., Christiaens, S., Ndaka, D. S., & Hendrickx, M. (2015). Hydration properties and texture fingerprints of easy-and hard-to-cook bean varieties. *Food Science and Nutrition*, 3(1), 39–47. <https://doi.org/10.1002/fsn3.188>
- Lee, C., Kim, E., Kim, H., Heo, W., Ahn, S., Park, J., Ban, C., & Lim, S. (2023). Comparison of the pretreatment methods for enhancing hydration of water-soaked adzuki beans (*Vigna angularis*). *Food Science and Biotechnology*, 2023(March), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01294-1>
- López, L. ., Ulloa, J. ., Ulloa, P. R., Ramirez, J. ., Carrillo Silva, Y., & Ramos Quintero, A. (2017). Modelling of hydration of bean(*Phaseolus Vulgaris* L .): Effect of the Low-Frequency Ultrasound. *Journal Food Science*, 29(September), 288–301. <https://doi.org/10.14674/1120-1770>
- Machado, M. F., Oliveira, F. A. R., & 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 and Technology*, 34(1), 47–57. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.1999.00238.x>
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2015). From the sigmoidal to the downward concave shape behavior during the hydration of grains: Effect of the initial moisture content on Adzuki beans (*Vigna angularis*). *Food and Bioproducts Processing*, 96(Fao), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.06.007>
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2018a). The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 352–370. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12328>
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2018b). The ultrasound assisted hydration as an opportunity to incorporate nutrients into grains. *Food Research International*, 106(January), 928–935. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.006>
- Miano, A. C., Ibarz, A., & Augusto, P. E. D. (2016). Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.020>
- Miano, A. C., Pereira, J. D. C., Castanha, N., Júnior, M. D. D. M., & Augusto, P. E. D. (2016). Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: Description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Scientific Reports*, 6(November), 1–14. <https://doi.org/10.1038/srep38996>
- Miano, A. C., Sabadoti, V. D., Pereira, J. da C., & Augusto, P. E. D. (2018). Hydration kinetics of cereal and pulses: New data and hypothesis evaluation. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12617>
- Nielsen, S. S. (2010). Determination of moisture content. In *Food Analysis Laboratory*

- Manual, Food Science Texts Series, High Performance Liquid Chromatography* (pp. 145–149). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1463-7>
- Ordóñez-Santos, L. E., Velasco-Arango, V. A., & Hleap-Zapata, J. I. (2022). Ultrasound-assisted extraction of total carotenoids in papaya epicarp and its application in Frankfurt sausage. *Ciencia e Agrotecnología*, *46*. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202246006722>
- Patero, T., & Augusto, P. E. D. (2015). Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains. *Ultrasonics Sonochemistry*, *23*, 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.10.021>
- Ranjbari, A., Kashaninejad, M., Aalami, M., Khomeiri, M., & Gharekhani, M. (2013). Effect of ultrasonic pre-treatment on water absorption characteristics of chickpeas (*Cicer arietinum*). *Latin American Applied Research*, *43*(2), 153–159.
- Sathe, S. K. (2015). Beans: Overview. In *Encyclopedia of Food Grains: Second Edition* (2nd ed., Vols. 1–4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00033-4>
- Ulloa, J. A., Enríquez López, K. V., Contreras Morales, Y. B., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, 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*, *13*(4), 588–596. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1024173>
- Ulloa, J. A., Rosas-Ulloa, P., Ramírez-Ramírez, J. C., & Ulloa-Rangel, B. E. (2016). Modelación matemática de las cinéticas de hidratación a diferentes temperaturas de cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L) producidas en México. *CienciaUAT*, *10*(2), 52–62. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v10i2.542>
- Vásquez, U., Siche, R., & Miano, A. C. (2021). Ultrasound-assisted hydration with sodium bicarbonate solution enhances hydration-cooking of pigeon pea. *LWT*, *144*(February), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111191>
- Wang, R. X., Li, Y. Q., Sun, G. J., Wang, C. Y., Liang, Y., Hua, D. L., Chen, L., & Mo, H. Z. (2023). Effects of Rehydration Time, Temperature and Ultrasound Treatment on Rehydration, Quality and Structure Properties of Low Moisture Texturized Soybean Protein. *Food Biophysics*. <https://doi.org/10.1007/s11483-023-09783-w>
- Xin, Y., Zhang, M., & Adhikari, B. (2014). Freezing Characteristics and Storage Stability of Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.) Under Osmodehydrofreezing and Ultrasound-Assisted Osmodehydrofreezing Treatments. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(6), 1736–1744. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1231-4>
- Xu, B. guo, Zhang, M., Bhandari, B., Cheng, X. feng, & Sun, J. (2015). Effect of Ultrasound Immersion Freezing on the Quality Attributes and Water Distributions of Wrapped Red Radish. *Food and Bioprocess Technology*, *8*(6), 1366–1376. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1496-x>

5. Evaluación de los cambios del contenido nutricional en la cocción del frijol común

Resumen

Las legumbres destacan por su gran aporte nutricional a la dieta humana. Sin embargo, las operaciones de preparación de estos alimentos provocan cambios físicos y químicos, contribuyendo de forma positiva o negativa en la calidad nutricional. Se realizó un seguimiento al contenido nutricional en dos variedades de frijol antes (sin procesar) y después de las operaciones de hidratación y cocción (procesadas). Para la variedad BIO101, la hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido (HCPU) redujo el tiempo de cocción (t_c) en un 23.2% con respecto al t_c obtenido en la hidratación convencional (HC), presentándose diferencias significativas entre los dos tratamientos ($p < 0.05$). Sin embargo, para la variedad Nima-Calima, el tratamiento de hidratación no presentó un efecto significativo en los tiempos de cocción ($p > 0.05$). Algunos nutrientes como los minerales y la proteína presentaron un ligero aumento de concentración luego de las operaciones de preparación y el tratamiento de hidratación implementado no influyó en el cambio de concentración de estos en ambas variedades. Para la variedad BIO101, las operaciones de preparación redujeron el contenido de azúcares en 29 y 24 % con la HC e HCPU respectivamente, presentando diferencias significativas en el tratamiento de hidratación empleado ($p < 0.05$). Para la variedad variedad Nima-Calima, se determinó una reducción de 35 y 36% en la HC e HCPU respectivamente, sin efecto significativo entre el tratamiento de hidratación empleado ($p > 0.05$). Los compuestos bioactivos como los fitatos presentaron una pérdida de 19 y 15% y compuestos fenólicos de 72 y 68% en la HC y HCPU respectivamente, siendo estos valores estadísticamente significativos ($p < 0.05$). Estos resultados podrían ser útiles para determinar los cambios nutricionales, según sea las operaciones de preparación del alimento.

Palabras claves: frijol, hidratación, cocción, nutrientes, antinutrientes

Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris*) es uno de los alimentos básicos en todo el mundo. Este alimento es de gran importancia debido a su aporte nutricional en proteína, minerales, vitaminas, carbohidratos, fibra dietaria, entre otros (Burgos-Edwards et al., 2023). Muchos han sido los estudios que han relacionado este alimento a la mejora de la salud, reducción del riesgo de adquirir enfermedades metabólicas y cardiovasculares, como también en la mejora de los niveles de hemoglobina y la hiperglucemia (Gomes Basso Los et al., 2018).

Uno de los procesos de preparación más comunes de este alimento es la cocción. La cocción es el proceso mediante el cual el alimento es inmerso en agua a temperatura de ebullición con la finalidad de garantizar un alimento inocuo, mejorar las propiedades organolépticas y la aceptabilidad general del consumidor (Tharanathan & Mahadevamma, 2003). La cocción y otros procesos térmicos generalmente conllevan a la pérdida del valor nutricional en el alimento, pero también pueden incidir en la inactivación de factores antinutricionales como por ejemplo, los inhibidores de proteasas, los cuales bloquean la actividad catalítica de enzimas como la tripsina y quimotripsina, impidiendo la digestión y disponibilidad de los nutrientes para los procesos bioquímicos en el ser humano (Margier et al., 2018). Por otro lado, la cocción también puede afectar la concentración de algunos compuestos bioactivos como los fitatos. Los fitatos suelen actuar como agentes quelantes de ciertos minerales como el hierro, calcio, zinc y magnesio, impidiendo la absorción de estos a través de la membrana intestinal, disminuyendo el aprovechamiento de estos micronutrientes (Hummel et al., 2020). Sin embargo, es poco el material científico basado en el estudio del efecto en los procesos de HC e HCPU en la incidencia de la calidad nutricional en los procesos de preparación del frijol mediante cocción.

Dada a la importancia del valor nutricional del frijol común (*Phaseolus vulgaris*), el objetivo de este capítulo fue realizar una evaluación nutricional del frijol antes y después de las operaciones de preparación (hidratación y cocción), según sea el tratamiento de hidratación empleado.

5.1 Materiales y métodos

5.1.1 Geolocalización desarrollo del proyecto

Los ensayos experimentales se realizaron en el Laboratorio de Calidad Nutricional del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en la localidad de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca, Colombia

5.1.2 Material de estudio

Dos variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) fueron evaluadas en este estudio. La variedad BIO101 biofortificada en hierro y zinc y la variedad comercial Nima-Calima. Ambas variedades fueron sometidas a una limpieza y selección exhaustiva de las semillas, posteriormente empacadas al vacío, para luego ser conservadas en condiciones óptimas a una temperatura de 18°C y humedad relativa 40% hasta sus respectivos análisis de interés.

5.1.3 Caracterización del material de estudio

▪ Evaluación morfológica de las semillas

La evaluación morfológica de las semillas se realizó según el Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (por sus siglas en inglés IPGRI) (Cruz Balarezo et al., 2009).

Tabla 5-1. Evaluación característica de las semillas de frijol común (*Phaseolus vulgaris*)

Carácter	Nombre y escala
Color primario de la semilla	Escala de color de 1-9. 1=blanco, 2=crema, 3= amarillo, 4= café, 5= rosado, 6= rojo, 7= morado, 8= negro, 9= otros
Color secundario de la semilla	Escala de color de 1-9. 1=blanco, 2=crema, 3= amarillo, 4= café, 5= rosado, 6= rojo, 7= morado, 8= negro, 9= otros
Patrón de color de semilla	0= no patrón, M= moteado, J= jaspeado, P= pinto, R= rayado, B=bicolor
Forma de la semilla	1= redonda, 2= ovalada, 3= cuboide, 4= arriñonada, 5 = truncada
Brillo u opacidad	1= opaco, 2=semibrillante, 3= brillante
Tamaño de la semilla (base 100 semillas)	1= pequeño (<25g), 2= mediano (25-40g), 3=grande (>40g)
Peso de la semilla	Peso en gramos de 100 semillas

▪ Evaluación color superficial de las semillas

Para la evaluación del color superficial de las semillas, se realizó mediante un colorímetro (Konica Minolta, CR-400, Japan), en espacio de color CIE L*a*b*. El instrumento fue estandarizado (Y= 83.1, X=0,3198, y=0.3355) usando iluminante D65 y °2 de observador. La evaluación del color se determinó por triplicado a cada muestra independiente. Las mediciones se realizaron directamente en la superficie de las muestras como lo indica Donsi et al., (2015). Los parámetros calculados fueron luminosidad (L*), ángulo de tonalidad (h°), diferencia total de color (ΔE) y cromaticidad y fueron obtenidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$h^{\circ} = \arctan \frac{b^{*}}{a^{*}} \quad (5.1)$$

$$\Delta E = [(\Delta L^2) + (\Delta a^2) + (\Delta b^2)]^{1/2} \quad (5.2)$$

$$C^{\circ} = [(a^{*2}) + (b^{*2})]^{1/2} \quad (5.3)$$

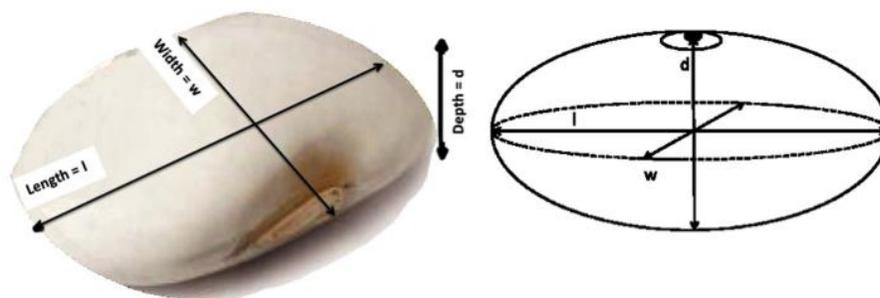
Si $1.5 < \Delta E$, se garantiza que no hay diferencia en la percepción del color entre las muestras comparadas (Ordóñez-Santos et al., 2022)

▪ Medición tridimensional de las semillas

La medición tridimensional de las semillas, se realizó como lo especifica Ghafoor et al. (2014). Brevemente, las dimensiones de largo (l), ancho (a) y profundidad (p) para cada semilla se determinó usando un calibrador de vernier o pie de rey (Mitutoyo, Calliper model 500-196-30, Japan), registrándose el valor promedio y su respectiva desviación estándar de cada 5 mediciones por dimensión. A partir de estos valores se calculó también el diámetro geométrico (d_g) de la semilla como lo indica la ecuación 5.4

$$d_g = (l * a * p)^{1/3}$$

Figura 5-1. Esquema de las diferentes dimensiones tomadas para la semilla largo (length), ancho (width) y profundo (depth) (Ghafoor 2014)



5.1.4 Determinación del tiempo de cocción

El tiempo de cocción de las semillas se determinó usando un equipo de Mattson Cooker como lo indica Proctor & Watts, (1987). El método se basa en identificar el tiempo mínimo que tarda los granos en lograr un ablandamiento determinado. Se tomaron 24 semillas individuales, previamente hidratadas por HC (21.7°C) o por HCPU (temperatura del medio de sonicación 55°C, tiempo de sonicación 15 min, potencia de sonicación 120 W) y se posicionó cada una en un orificio de una plataforma metálica. Posteriormente, se situó sobre cada una de las semillas un pin de 90 g peso. Una vez colocadas las semillas y sus respectivos pines, el sistema fue sumergido en un recipiente de 2 L de capacidad que contenía 1.6 L de agua tipo 1 (resistividad máxima de 18.2 MΩ.cm) con una temperatura mayor de 95 °C. A partir del instante en que fue sumergido el sistema en su totalidad y se inició la aplicación del contador de tiempo. El t_c , se consideró cuando el 80% de las semillas evaluadas fueron perforadas por el pin, como lo indicó Qureshi et al. (2019).

5.1.5 Determinación del contenido de materia seca

La determinación del contenido de materia seca en las semillas de frijol no procesadas y procesadas se realizó como lo indica Nielsen (2010). Se pesó 2 g de las semillas de frijol sin procesar y 5 g de las semillas procesadas en platos de aluminio y posteriormente se llevaron a un horno de secado (BINDER, model 9010-0164, USA) a una temperatura de 105 °C por 24 h. El porcentaje de materia seca fue calculado como lo indica la siguiente ecuación:

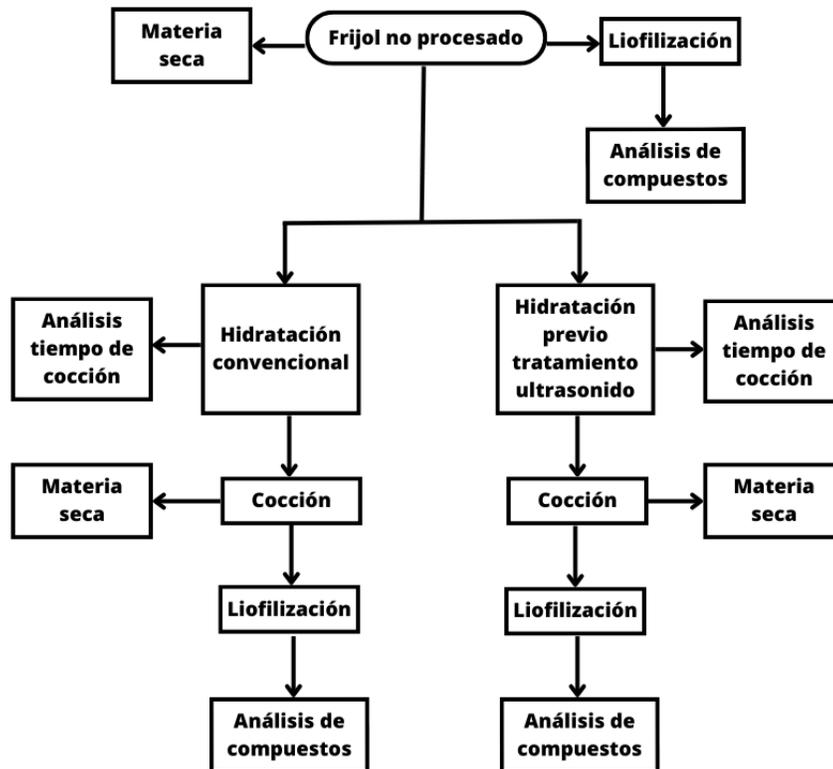
$$\% \text{ materia seca} = \left(1 - \frac{P_i - P_f}{P_i}\right) \times 100 \quad (5.5)$$

Donde P_i es el peso inicial de la muestra húmeda y P_f es el peso final de la muestra seca.

5.1.6 Determinación de compuestos nutricionales y antinutricionales

Para la evaluación de los compuestos nutricionales y antinutricionales, en primer lugar, las semillas de frijol no procesadas y procesadas, fueron previamente maceradas en un mortero provisto de un pilón, ambas piezas de material de porcelana. Posteriormente, las semillas maceradas se llevaron a un liofilizador (Labconco, Freezone 12, USA) en donde se les eliminó el agua por sublimación. Una vez las semillas fueron liofilizadas, se pesaron 6 g de éstas y se molieron en un molino de cuchillas de acero inoxidable (IKA, tube milling c5000, China) a 20000 rpm durante 48 s. La harina obtenida se transfirió a recipientes de polietileno tapados y sellados con papel parafinado para luego ser almacenados en un cuarto frío a una temperatura de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los análisis de interés. La figura 5-2 muestra el esquema de las etapas del proceso y sus respectivos análisis.

Figura 5-2. Esquema de las etapas de procesamiento y análisis de la muestra



- **Cuantificación de hierro y zinc**

La determinación de hierro y zinc se realizó por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) mediante un equipo de rayos-X (S2 Puma, BRUKER, USA) como lo indica Guild et al. (2017). Se transfirió aproximadamente 5 g de harina de frijol a una cápsula de polietileno provista de una película de polipropileno (Poly4 sample film, Hitachi, Japan) en su parte inferior. Cada muestra fue analizada por duplicado y tanto el contenido de hierro como el del zinc fue reportado como un valor promedio de duplicados de muestra con su respectiva desviación estándar en mg de hierro (o zinc) por kg de muestra.

- **Proteína total**

La determinación de proteína total se realizó por el método Kjeldahl siguiendo la metodología propuesta por Sáez-Plaza et al. (2013). Se pesó 1 g de harina de frijol, 0.5 g de sulfato de cobre y 5 g de sulfato de sodio anhidro en un tubo de digestión de 400 mL de capacidad. Se agregó 13 mL de ácido sulfúrico concentrado y se llevó a un bloque de digestión (FOSS, Digestor 2508, USA) por 1 h a 420 °C. La muestra digerida se destiló en un equipo de destilación automática (FOSS, Kjeltec 8100, USA) agregándose 50 mL de hidróxido de sodio al 40% y el destilado se recogió en un matraz erlenmeyer de 250 mL de capacidad, el cual contenía 50 mL de ácido bórico al 4% y 5 gotas indicador verde bromocresol / rojo de metilo. Posteriormente el destilado se valoró con una solución estandarizada de ácido clorhídrico (0.1 N). El porcentaje de proteína en la muestra se calculó a partir del porcentaje de nitrógeno obtenido, multiplicado por el factor de conversión (K) igual a 6.25, valor de referencia para alimentos vegetales.

- **Determinación de compuestos fenólicos**

La determinación de compuestos fenólicos se realizó como lo indica Lin et al. (2008). Se pesó 0.25 g de harina de frijol en un tubo para centrifuga de 15 mL de capacidad. Posteriormente se le agregó 2.5 mL de solución extractora de metanol al 80% y se dejó en agitación constante (Fisher Brand, Multitube vortexer cat 02215450, USA) durante 1 h. Posteriormente, se centrifugó en una centrifuga (Eppendorf, Centrifuge 5810R, Germany) a 3200 rpm durante 15 minutos. Se tomó 1 mL del extracto y se filtró (0.22 µm tamaño de poro). El filtrado fue recolectado en viales de vidrio de 2 mL y se inyectó en el sistema cromatográfico.

Para el procedimiento de separación cromatográfico, se utilizó una columna C18 (Phenomenex, Synergi 4u Hydro-RP 80A 150X4.6 mm, USA). La elución en gradiente fue compuesta por una mezcla de A (0.1 % de ácido fórmico en agua) y B (0.1 % de ácido fórmico en acetonitrilo). El flujo de elución del sistema cromatográfico fue de 1 mL/min. Se utilizó un detector de arreglo de diodos (Agilent, 1200 DAD G1315D, USA) y se obtuvieron cromatogramas a 3 longitudes de ondas fijas 260, 280 y 370 nm. Se estimó un tiempo de corrida por ensayo de 1 h (Tabla 5-2).

Tabla 5-2. Rango de curva de calibración, longitud de onda de detección y tiempo de retención para cada uno de los reactivos estándares de compuestos fenólicos

Estándar	Rango curva calibración (mg/mL)	R ²	Longitud de onda detección (nm)	Tiempo de retención (min)*
Ácido 3-4 dihidroxibenzoico	0.001-0.01	0.998	260	4.23
Catequina	0.01-0.1	0.999	280	6.68
Miricetina 3-glucósido	0.001-0.1	0.999	260	15.88
Quercetina 3-glucósido	0.001-0.1	0.998	260	21.37
Kaempferol 3-glucósido	0.01-0.1	0.999	260	26.05
Miricetina	0.001-0.1	0.998	370	28.51
Quercetina	0.001-0.1	0.999	260	39.32
Kaempferol	0.001-0.1	0.999	370	47.89

▪ Determinación de azúcares solubles

Se determinó el contenido de verbascosa, estaquiosa, rafinosa, sacarosa, glucosa y fructosa como lo indica Pan et al. (2015). Se pesó 0.1 g de harina de frijol en tubos para centrifuga de 2 mL de capacidad. Se agregó 1 mL de solución extractora de etanol al 80%. Los tubos para centrifuga fueron agitados (Fisher Scientific, Standar vortex mixer cat. 02216108, USA) por 30 s para homogenizar la muestra y posteriormente se llevó a un baño con control de temperatura (Thermo Scientific, Precision Bath Model 2872, USA) a 80°C durante 10 minutos. Los tubos fueron centrifugados (Eppendorf, Centrifuge 5804R, Germany) a 8000 rpm por 10 min y el extracto fue trasvasado a un nuevo tubo limpio y seco. Este procedimiento de extracción se repitió nuevamente, pero con 0.5 mL de solución

extractora. Los extractos de ambas extracciones fueron combinados en un mismo tubo y se llevó a secar en un concentrador al vacío (Labconco, Centrivap, DNA Vacuum Concentrator cat. 7970010, USA) a una temperatura de 40 °C durante 6 horas o hasta sequedad total. El residuo seco se disolvió con 0.6 mL de agua tipo 1. Se filtró en filtro de 0.22 µm y se recolectó en viales de vidrio de 2 mL, finalmente se inyectó en el sistema cromatográfico.

Para el procedimiento de separación cromatográfico, se utilizó una columna especial para azúcares (Waters, Sugarpak- columna, 10 µm, 6.5 mm X 300mm, USA) a una temperatura de 80 °C. Se utilizó como fase móvil una solución de EDTA-Ca 5 mM. El flujo de elución del sistema cromatográfico fue de 0.6 mL/min. Se utilizó un detector de índice de refracción (Agilent, 1200 RID G7162A, USA) con una temperatura de celda de 35 °C. El tiempo de corrida por ensayo fue de 30 min (ver tabla 4-3).

Tabla 5-3. Rango de curva de calibración y tiempo de retención para cada uno de los reactivos estándares de azúcares solubles

Estándar	Rango curva calibración (mg/mL)	R ²	Tiempo de retención (min)*
Verbascosa	0.2-2.2	0.998	4.84
Estaquiosa	0.1-10.1	0.999	5.15
Rafinosa	0.05-10.18	0.999	5.67
Sacarosa	0.13-20.80	0.999	6.42
Glucosa	0.13-20.43	0.999	7.98
Fructosa	0.05-10.55	0.999	9.57

▪ Determinación del contenido de ácido fítico

Se determinó el contenido de ácido fítico como lo indica Latta & Eskin (1980), modificado por Lehrfeld (1989). Se pesó 1 g de harina de frijol en tubos para centrifuga de 50 mL de capacidad. Posteriormente se agregó 20 mL de ácido clorhídrico 0.65 M y se llevó a agitación constante (FisherBrand, Multitube vortexer cat 02215450, USA) por 2 h. Una vez finalizada la agitación, las muestras fueron centrifugadas (Eppendorf, Centrifuge 5810R, Germany) a 3500 rpm por 15 min. Se trasvasó 12 mL del extracto a un nuevo tubo para centrifuga limpio y seco de 15 mL de capacidad. Para el proceso de separación y

purificación del ácido fítico, se usaron columnas de intercambio iónico (BioRad Laboratories, Poly-prep Prefilled Chromatography Columns AGX8 resin 200-400 mesh Chlorideform 0,8x4,0 cm, USA) acopladas en un equipo de para vacío (Supelco, Visiprep™ Solid Phase Extraction Vacuum Manifold, USA) provisto de una bomba de vacío (GAST manufacturing Inc., DOA-P704-AA, USA). Las columnas de intercambio iónico se acondicionaron con 5 mL de ácido clorhídrico 0.2 M y posterior elución del líquido. Se agregó 2 ml de los sobrenadantes a cada columna y luego se realizó la elución. Seguido, se agregaron 10 mL de cloruro de sodio 0.07 M para la elución de los fosfatos no relacionados con el ácido fítico y finalmente se eluyó el ácido fítico con 30 mL de cloruro de sodio 0.7 M, recolectándose en tubos de ensayo limpios y secos para posterior cuantificación del analito. Se realizó una curva de concentración de ácido fítico en un rango entre 5 mg/mL y 60 mg/mL a partir de una solución stock de 200 mg/mL de ácido fítico (absorbancia=0.0114 [concentración A.F.]+0.026; $R^2=0.998$). Se tomó 0.9 mL de los extractos de muestra, estándares de calibración y testigos en tubos para centrifuga de 2 mL de capacidad y se agregó 0.3 mL de reactivo de Wade. Se homogenizó la mezcla y se leyó en espectrofotómetro (Biotek, Epoch2 microplate reader, USA) a una longitud de onda de 500 nm. Los valores de cuantificación de ácido fítico se reportaron en mg de ácido fítico por gramos de muestra.

5.1.7 Análisis estadístico

Los resultados fueron expresados como el promedio de tres réplicas y su respectiva desviación estándar. Para evaluar el efecto de cada tratamiento sobre las variables de respuesta, se realizó mediante un ANOVA de una vía ($p<0.05$) y las diferencias significativas entre valores promedio fue determinado por una prueba post HOC (Tukey test, $p<0.05$). Para ello se utilizó el programa de computación estadística y de gráficos R-project versión 4.2.2. bajo la implementación del paquete agricolae versión 1.3.5

5.2 Resultados y discusión

5.2.1 Caracterización física y tiempo de cocción

Algunos caracteres morfológicos mostraron diferencias entre las variedades de frijol estudiadas como lo presenta la tabla 5-4. El peso de las 100 semillas de la variedad Nima-

Calima fue 1.8 veces mayor al peso de las 100 semillas de la variedad BIO101. La variedad Nima-Calima presentó el carácter de color secundario, con carácter de patrón de color moteado, mientras para la semilla BIO0101 estos caracteres fueron nulos debido a su característica de color monocromático. Con respecto al carácter de la forma de la semilla, ambas variedades se clasificaron como semillas arriñonadas. El brillo u opacidad fue semibrillante y brillante para la variedad BIO101 y Nima-Calima. Además, el peso de las semillas normalmente está relacionado al tamaño de la semilla. Por ello, era de esperarse que las semillas de la variedad Nima-Calima presentaran el carácter de tamaño de semilla grande (>50g/100 semillas), mientras que la variedad BIO101, al estar en el rango entre 20 g/100 semillas y 40 g/100 semillas presentaron el carácter de semilla de tamaño mediano. Cabe resaltar que los caracteres de color de semilla y el carácter de tamaño de semilla son los caracteres de mayor influencia para el consumidor, cuya preferencias están tienen mayor relación a términos regionales y culturales (da Conceição-dos Santos et al., 2022).

Tabla 5-4. Características morfológicas iniciales de las semillas

Caracter	BIO101	Nima-Calima
Color primario semilla	5	6
Color secundario semilla	no presenta	1
Patrón de color semilla	0	M
Forma semilla	4	4
Brillo u opacidad	2	3
Peso 100 semillas(g)	29.1±0.3	53.3±1.2
Tamaño semilla	mediano	grande

De los resultados de las mediciones tridimensionales y del diámetro geométrico de las semillas, se puede decir que estos tienen una relación directa con el peso de las semillas. Es decir, el valor obtenido del diámetro geométrico de una semilla, está ligado tanto a su peso, como a su tamaño (Tabla 5-5). Los resultados son congruentes a los reportados por Ulloa et al. (2015). Estos investigadores determinaron el peso para el frijol pinto (26.7±0.1/100 semillas) y obtuvieron medidas de 12.8 mm, 7.4 mm, 5.0 mm y 7.7 mm de largo, ancho, profundidad y diámetro geométrico respectivamente, similar a los resultados obtenidos para la variedad BIO101. Igualmente, reportaron un peso para el frijol mayacoba

(46.2±0.1 g/100 semillas) con medidas de 12.8 mm, 7.3 mm, 6.2 mm y 8.3 mm de largo, ancho, profundidad y diámetro geométrico respectivamente, analogo a los valores obtenidos para variedad Nima-Calima. Además, para la variedad BIO101, luego del proceso de cocción, las semillas presentaron un cambio en su tamaño en 35.3% en su largo, -1.35% en su ancho y 79.1% en profundidad. Para la variedad Nima-Calima, el proceso de cocción un aumento el porcentaje en 36.0%, 6.4% y 44.4% en el largo, ancho y profundidad respectivamente. Ambas variedades de frijol no presentaron diferencias significativas en el cambio de dimensión del ancho ($p>0.05$), pero si presentaron cambios significativos en las dimensiones de largo y profundidad ($p<0.05$). Además, el tipo de hidratación implementado no influyo en el diámetro geométrico de las semillas luego de la cocción. Aunque que gran parte del aumento en el tamaño en las semillas de frijol se da en la etapa de la hidratación, se cree que las semillas alcanzan un tamaño máximo en la etapa de la cocción, debido a los cambios físicos y químicos que sufre el almidón al ser expuesto térmicamente, ya que el almidón es el principal componente del frijol común y representa entre 32 y 57% del peso de la semilla (Fabbri & Crosby, 2016). Cuando el frijol es remojado, los gránulos del almidón tienden a hincharse por efecto de la hidratación, lo que conlleva a un aumento general en el tamaño de la semilla. Luego, en el proceso de cocción, los gránulos de almidón hidratados sufren un proceso de gelatinización, rompiendo su estructura cristalina, asegurando que el aumento del tamaño de la semilla de frijol se mantenga (Wood, 2017)

Tabla 5-5. Datos de tamaño de frijol, color y tiempo de cocción.

Parámetro	BIO101			ANOVA	Nima-Calima			ANOVA
	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)		Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	
Largo (mm)	11.9±0.7 ^a	16.1±1.0 ^b	17.0±1.1 ^b	***	15.0±1.8 ^a	20.4±1.4 ^b	19.2±1.2 ^b	***
Ancho(mm)	6.6±0.3 ^a	6.5±0.4 ^a	6.7±1.0 ^a	NS	7.8±0.7 ^a	8.3±0.7 ^a	8.8±0.6 ^a	NS
Profundidad (mm)	4.8±0.4 ^a	8.6±0.5 ^b	9.1±0.8 ^b	***	6.1±0.8 ^a	10.3±0.6 ^b	9.9±0.8 ^b	***
Diámetro geométrico (mm)	7.3±0.4 ^a	9.6±0.5 ^b	10.7±0.7 ^b	***	8.9±0.7 ^a	12.1±0.8 ^b	14.0±1.2 ^b	***

(Continúa)

Parámetro	BIO101			ANOVA	Nima-Calima			ANOVA
	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)		Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	
L*	39.8±0.3 ^a	44.8±0.2 ^b	43.6±0.9 ^b	*	41.2±0.8 ^a	47.0±0.9 ^b	46.3±1.0 ^b	*
h°	0.44±0.1 ^a	0.96±0.1 ^b	1.0±0.2 ^b	***	0.61±0.2 ^a	0.98±0.3 ^a	0.91±0.7 ^a	NS
ΔE	--	6.02±0.5 ^a	6.13±0.3 ^a	NS	--	6.13±0.6 ^a	6.22±0.9 ^a	NS
C*	5.84±0.1 ^a	11.42±0.4 ^b	11.98±0.3 ^b	***	9.34±0.3 ^a	11.43±0.2 ^b	11.23±0.1 ^b	*
Tratamiento de hidratación								
Tiempo de cocción (min)		43.3±0.2 ^a	33.2±4.6 ^b	*		51.3±2.5 ^a	51.8±1.7 ^a	NS

(*) significativo $p < 0.05$; (**) significativo $p < 0.01$; (***) significativo $p < 0.001$; NS no hay diferencia significativa ($p > 0.05$); (a-b-c) Medias dentro de las filas con letras diferentes, son significativamente diferentes ($p > 0.05$); HC= hidratación convencional; HCPU= hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido.

Los parámetros de color se vieron afectados debido al proceso de cocción en ambas variedades (Tabla 5-5). El procesamiento del frijol afectó los valores de luminosidad (L*) en ambas variedades con un aumento significativo de este parámetro ($p < 0.05$). Algunos autores han atribuido el cambio del valor de luminosidad, principalmente al contenido de las proantocianidinas que se encuentran en la testa. Estos polifenoles, generalmente son compuestos termolábiles y suelen cambiar su estructura química o descomponerse fácilmente a partir de temperaturas mayores de 28 °C (Aravindakshan et al., 2022). El parámetro h° (ángulo de tonalidad) presentó diferencias significativas en la variedad BIO101 por ambos tratamientos de hidratación ($p < 0.05$). No obstante, la variedad Nima-Calima, no presentó cambios significativos en este parámetro y tanto los tratamientos de hidratación, como el proceso de cocción, no influyeron en esta característica ($p > 0.05$). La diferencia total color total (ΔE) muestra que existe diferencia en la percepción del color entre el frijol sin procesar y procesado en ambas variedades, ya que un valor de $\Delta E > 1.5$ indica que existe una distinción visual perceptible en las muestras comparadas (Ordóñez-Santos et al., 2017; Ordóñez-Santos et al., 2022). Sin embargo, los valores de ΔE comparados entre tratamientos de hidratación, no tuvieron diferencias significativas ($p > 0.05$), lo que indica que los tratamientos no influyeron en los valores obtenidos del parámetro ΔE , tanto para la variedad BIO101, como la variedad Nima-Calima, posiblemente a una disminución de la concentración de pigmentos de carácter fenólico durante las etapas de preparación y que probablemente queden en el agua de cocción.

Cabe indicar que, algunos pequeños cambios en la semillas de frijol de color blanco o moteadas (como la variedad Nima-Calima), tienen la tendencia a tomar un color amarillento (Porch et al., 2017). Otros autores han relacionado el cambio de color, pero en menor medida al pardeamiento no enzimático asociado a la reacción de Maillard (Ren et al., 2017). Para los resultados de índice de cromaticidad (C^*), ambas variedades presentaron diferencias significativas entre el frijol sin procesar y procesado en ambos tratamientos de hidratación. El aumento de los valores de índice de cromaticidad en el frijol procesado con respecto al frijol sin procesar, es una particularidad del aumento de la intensidad del color, haciéndose más perceptible al ojo humano, convirtiéndose en una característica ideal para los consumidores (De Almeida et al., 2017).

El tiempo requerido para la cocción de las semillas del frijol es otra de las cualidades importantes en la preparación doméstica, como industrial, ya que una legumbre que requiera tiempos prolongados en el proceso de cocción, también requerirá mayor consumo de energía calórica, lo que se traduce en un aumento de costos para la preparación de este alimento a pequeña o grande escala (Wood, 2017). Además, realizar una buena hidratación, asegura una reducción en el t_c del frijol. Se encontró que el t_c en la variedad BIO101 presentó diferencias significativas con respecto al tratamiento de hidratación implementado ($p < 0.05$). Sin embargo, no se obtuvieron los mismos resultados para la variedad Nima-Calima, en donde el uso del ultrasonido no tuvo efecto en el t_c ($p > 0.05$). No obstante, algunos autores han reportado que el uso del ultrasonido y el tiempo de exposición de las semillas al ultrasonido tienen un impacto directo en la reducción del t_c (Ulloa et al., 2015). Ahora bien, es posible que los resultados del t_c no hayan sido conforme a lo que se esperaba en la variedad Nima-Calima y su proceso de hidratación asistido por ultrasonido. Esto podría ser que estemos tratando frente a un frijol que haya presentado cambios biofísicos y bioquímicos en la testa y el cotiledón debido al tiempo de almacenamiento luego de su cosecha (Reyes-Moreno & Paredes-López, 1993). Además, cabe recalcar que la variedad Nima-Calima fue la variedad que se obtuvo en un establecimiento comercial, por lo que se desconoce las condiciones en las que estuvo almacenado el frijol desde su cosecha hasta la obtención del material para ser estudiado, por lo que la temperatura y la humedad relativa del lugar de almacenamiento puede influir en el fenómeno de dificultad de cocción (HTC/Hard To Cook), ya que los almacenamientos prolongados del frijol a temperaturas mayores de 25°C y humedades relativas del 65% son

condiciones que llevan al desarrollo de la característica HTC (Perera et al., 2023). Sin embargo, cabe mencionar que el método implementado para determinar el tiempo de cocción de las variedades de frijol tiene puntos a favor y en contra. Algunos aciertos son que el investigador tiene la oportunidad de obtener información de 24 semillas individuales escogidas al azar, y este puede examinar la variabilidad de la muestra, además de obtener un rango del tiempo de cocción de una cantidad significativa de las semillas. También, los resultados se expresan en unidades de tiempo, lo cual facilita su interpretación, en lugar de reportarse en otro parámetro como fuerza, viscosidad, etc. Por otro lado, el método también presenta algunos desaciertos con respecto a ciertas semillas, principalmente aquellas semillas cuya testa tienen la particularidad de ser muy gruesas y fuertes, ocasionando resistencia a la perforación del pin sobre la semilla de frijol, conduciendo a resultados inconsistentes en el tiempo de cocción.

5.2.2 Contenido nutricional en el frijol crudo y cocinado

La tabla 5-6 y 5-7 se resume los resultados del contenido de compuestos nutricionales y antinutricionales respectivamente, para las variedades de frijol evaluadas.

Tabla 5-6. Contenido de compuestos nutricionales sin procesar y procesado en las variedades estudiadas.

Compuesto nutricional	BIO101				Nima-Calima			
	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	ANOVA	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	ANOVA
Hierro (mg/Kg)	82.7±3.9 ^a	88.9±5.0 ^a	91.6±2.5 ^a	NS	74.2±6.0 ^a	79.5±1.5 ^a	80.6±2.4 ^a	NS
Zinc (mg/Kg)	39.2±3.0 ^a	43.5±2.3 ^a	40.8±1.9 ^a	NS	26.8±2.2 ^a	30.4±1.5 ^a	28.0±0.5 ^a	NS
Proteína (%)	26.8±0.4 ^b	28.1±0.3 ^a	28.4±0.4 ^a	**	23.6±1.0 ^a	23.8±0.8 ^a	24.2±0.2 ^a	NS
Acido 3-4 dihidroxibenzoico (mg/100g)	1.12±0.12	ND	ND	NA	1.13±0.10	ND	ND	NA
Kaampferol 3-glucósido (mg/100g)	41.4±4.00 ^a	8.0±0.75 ^b	8.7±0.56 ^b	***	1.18±0.15 ^a	0.29±0.06 ^b	0.12±0.02 ^b	***

(Continua)

Compuesto nutricional	BIO101				Nima-Calima			
	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	ANOVA	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	ANOVA
Catequina (mg/100g)	19.47±1.15 ^a	3.39±0.57 ^b	4.42±0.03 ^b	***	16.19±0.97 ^a	4.27±0.79 ^b	5.52±0.09 ^b	***
Kaempferol (mg/100g)	0.92±0.04	ND	ND	NA	0.68±0.02 ^a	0.59±0.01 ^b	0.48±0.06 ^c	**
Sacarosa (mg/g)	16.2±0.84 ^a	11.5±0.17 ^b	14.5±1.16 ^a	**	22.8±1.75 ^a	15.1±0.47 ^b	16.8±0.25 ^b	***
Glucosa (mg/g)	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA
Fructosa (mg/g)	0.78±0.03 ^a	0.38±0.01 ^b	ND	***	0.39±0.01 ^a	0.25±0.00 ^b	ND	***

(*) significativo $p < 0.05$; (**) significativo $p < 0.01$; (***) significativo $p < 0.001$; NS no hay diferencia significativa ($p > 0.05$); (^{a-b-c}) Medias dentro de las filas con letras diferentes, son significativamente diferentes ($p > 0.05$); (NA) No Aplica por ausencia de datos numéricos; (ND) analito No Detectable
 HC= hidratación convencional; HCPU= hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido

Tabla 5-7. Contenido de compuestos antinutricionales sin procesar y procesado en las variedades estudiadas.

Compuesto antinutricional o no deseable	BIO101				Nima-Calima			
	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	ANOVA	Sin procesar	Procesado (HC)	Procesado (HCPU)	ANOVA
Myricetina 3-glucósido (mg/100g)	ND	ND	ND	NA	0.61±0.02 ^a	0.37±0.02 ^b	0.28±0.04 ^c	***
Miricetina (mg/100g)	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA
Quercetina 3-glucósido (mg/100g)	0.69±0.05 ^a	0.51±0.12 ^a	ND	NS	0.57±0.1 ^a	0.1±0.07 ^b	ND	***
Quercetina (mg/100g)	ND	ND	ND	NA	ND	ND	ND	NA
Verbascosa (mg/g)	1.00±0.02 ^a	1.03±0.03 ^a	0.88±0.04 ^b	**	1.4±0.16 ^a	0.97±0.13 ^b	0.91±0.11 ^b	**
Estaquiosa (mg/g)	21.4±1.55 ^a	15.2±0.31 ^b	18.2±1.18 ^c	**	18.6±0.74 ^a	11.4±0.67 ^b	12.5±0.31 ^b	***
Rafinosa (mg/g)	2.9±0.09 ^a	2.06±0.08 ^b	2.02±0.10 ^b	***	1.53±0.16 ^a	0.69±0.20 ^b	0.90±0.07 ^b	**
Acido fítico (mg/g)	15.6±0.59 ^a	12.5±1.21 ^b	13.1±0.62 ^b	*	13.8±1.36 ^a	11.8±0.99 ^a	11.7±0.22 ^a	NS

(*) significativo $p < 0.05$; (**) significativo $p < 0.01$; (***) significativo $p < 0.001$; NS no hay diferencia significativa ($p > 0.05$); (^{a-b-c}) Medias dentro de las filas con letras diferentes, son significativamente diferentes ($p > 0.05$); (NA) No Aplica por ausencia de datos numéricos; (ND) analito No Detectable
 HC= hidratación convencional; HCPU= hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido

Minerales. Se determinó que los valores de hierro y zinc en el frijol sin procesar (crudo) de la variedad BIO101, fueron mayores que los valores encontrados en el frijol sin procesar de la variedad Nima-Calima. Estos resultados eran los esperados, ya que la variedad BIO101 es una variedad de frijol que ha sido biofortificada mediante técnicas convencionales con la finalidad de obtener un contenido superior de micronutrientes en comparación con otras variedades de frijol habituales y se han reportado concentraciones 88 mg/kg de hierro y 37 mg/kg de zinc (Beintema et al., 2018). Sin embargo, cabe indicar que la variedad Nima-Calima presentó una concentración de hierro mucho más alta con respecto a los valores reportados por otros autores. Hummel et al. (2020) estudiaron el contenido nutricional de siete variedades de frijol biofortificadas y habituales, entre ellas la variedad de frijol Calima. Los autores reportaron una concentración de 54 mg/kg de hierro y 30 mg/kg de zinc, demostrando que la variedad Nima-Calima estudiada, presentó 20ppm mayor en la concentración de hierro. La alta concentración de hierro obtenida en la variedad evaluada Nima-Calima podría atribuirse diversos factores como por ejemplo, la contaminación del lote de producción posiblemente por la exposición de las semillas a diversas fuentes de hierro luego de la cosecha como contaminación por residuos del suelo, contacto directo con las maquinarias implementadas para el trillado y limpieza del frijol las cuales pueden estar en mal estado (oxidadas) y falta de protocolos en el proceso de embalaje, transporte y conservación de las semillas (Stangoulis & Sison, 2008). Por otra parte, ambas variedades en estudio presentaron un aumento, aunque imperceptible, en la concentración de minerales tanto de hierro, como en zinc, luego de las etapas de preparación (hidratación y cocción), en donde el tratamiento de hidratación empleado (HC o HCPU) no influyó en los resultados y no hubo diferencias significativas entre el contenido de hierro y zinc el frijol sin procesar y procesado para ambas variedades ($p > 0.05$). Se puede argumentar entonces que los tratamientos de hidratación implementados aquí, no afectaron el contenido final de estos micronutrientes. Algunos autores relacionan que la retención de ciertos compuestos nutricionales están más favorecidos que otros, los cuales pueden ser más susceptibles a ser extraídos de la matriz sólida y que mayormente son influenciados por el tiempo y la temperatura de hidratación, cuya concentración dentro de la matriz sólida puede ser menor o mayor, según sea su susceptibilidad a la extracción, como también a la pérdida de peso de la matriz alimentaria por el efecto de la lixiviación de sólidos disueltos (Ranjbari et al., 2013).

Proteína. Los resultados obtenidos en la determinación de proteína, la variedad BIO101, presentó 3 puntos porcentuales mayor que la variedad Nima-Calima ambas en su forma sin procesar. Sin embargo, estos porcentajes se asemejan a los reportados en otros estudios, donde los autores reportan un valor promedio de proteína de 24 g/100 g de semilla de frijol (Siddiq et al., 2012). También, Wainaina et al. (2021), reportó valores de proteína entre 16-33%. Se determinó que el porcentaje de proteína en la variedad BIO101 presentó un aumento significativo luego de las operaciones de preparación (hidratación y cocción) con respecto a las semillas sin procesar ($p < 0.05$). En cambio, para la variedad Nima-Calima, no se encontró diferencia significativa entre los valores de proteína en el frijol sin procesar con respecto al frijol procesado. Este ligero aumento porcentaje de proteína luego del proceso de hidratación y cocción, presentó el mismo comportamiento descrito anteriormente para los minerales de hierro y zinc, relacionándose a la pérdida de materia seca de la matriz alimentaria, debido a los sólidos disueltos totales que se generan principalmente durante el proceso de hidratación y durante el proceso de cocción, reportándose un porcentaje entre 2-19% de sólidos disueltos dependiendo del tiempo de hidratación, tiempo de cocción y de las características fisicoquímicas de la variedad de frijol a preparar (Güzel & Sayar, 2012). Con respecto los tratamientos de hidratación implementados en las dos variedades frijol, la prueba de Tukey arrojó que no había evidencia estadística para argumentar que los tratamientos aplicados diferían significativamente, con respecto a la retención o aumento de la concentración de proteína. No obstante, Singla & Sit (2021), afirmaron que la cocción por ultrasonido de frutas y legumbres podría mejorar la retención de nutrientes, la transferencia de calor y los atributos sensoriales.

Compuestos fenólicos. Alrededor del 11% del contenido total de los compuestos fenólicos se encuentran en la testa, los cuales son muy variados y están relacionados con el color de la cubierta de la semilla, incluyendo compuestos como antocianinas, glucósidos de flavonoles y taninos condensados (Ganesan & Xu, 2017). Se encontró que, en la determinación del perfil fenólico de las variedades de frijol, algunos compuestos como el ácido 3-4 dihidroxibenzoico se eliminó en su totalidad posiblemente durante el proceso de hidratación o el proceso de cocción. Son muy pocos los autores que han informado sobre el contenido de un compuesto fenólico en específico en un alimento en particular, principalmente en el frijol. Sin embargo Díaz et al. (2010), estudió algunos de los

compuestos fenólicos en ascensiones de frijol a partir de la testa de la semilla. Estos investigadores encontraron un contenido de *p*-ácido hidroxibenzoico en un rango entre 4.5 y 8.6 mg/100g. A pesar de que el rango reportado es un poco mayor a los resultados obtenidos, es importante tener en cuenta otras características como el grado de vejez del grano, las condiciones de conservación (exposición a luz directa y humedad relativa) y la intensidad del color de la testa. Según los resultados obtenidos muestran que el 3,4-hidroxibenzoico podría ser uno de los muchos compuestos con susceptibilidad al remojo o a la cocción. Garretson et al. (2018), analizó un frijol autóctono pigmentado (pigmented heirloom beans), junto con el frijol pinto (ambas variedades de la misma especie *Phaseolus vulgaris*), el efecto que tenía el remojo y la cocción sobre la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos totales, reportando que el proceso de remojo indujo a la pérdida entre el 10 y 25% de estos compuestos, mientras que, para la cocción, la pérdida total de compuestos fenólicos osciló entre el 30 y 60%. En la determinación de kaempferol 3-glucósido, el análisis estadístico obtenido en la variedad BIO101 fue significativamente diferente entre los valores obtenidos de la semilla procesada, con respecto a las semillas sin procesar ($p < 0.05$). Sin embargo, no se presentó diferencia significativa entre los tratamientos de hidratación y la reducción de la concentración de este compuesto estuvo cerca al 80% para ambos tratamientos de hidratación. Igualmente, la variedad Nima-Calima reportó una reducción en la concentración de 75 y 90% para la HC e HCPU respectivamente. Otro de los compuestos que presentaron reducción en la concentración fue la catequina. Para la variedad BIO101, el procesamiento tuvo un efecto significativo en la concentración con respecto al frijol sin procesar ($p < 0.05$). Mientras que los tratamientos de hidratación no presentaron cambios sobre la concentración, la HCPU influyó un poco menos que la HC en la disminución de este compuesto y los valores de la pérdida de concentración se ubicaron en un rango porcentual entre 77 y 82%. No siendo diferente para la variedad Nima-Calima, en donde se encontró igualmente diferencias significativas en la concentración de catequina en el frijol sin procesar y procesado. Similar, a que ambos tratamientos de hidratación no presentaron diferencia estadística, siendo la HCPU fue la que menos impacto tuvo sobre la disminución de la concentración de este compuesto fenólico con respecto a la HC. Los resultados concuerdan con los expuestos por Xu & Chang (2009). Los autores estudiaron dos variedades de frijol (pinto y negro) y el efecto de la cocción en los compuestos fenólicos. Estos autores reportaron una disminución en la concentración de kaempferol 3-glucósido de 46% y de catequina de 51% luego de

haberse realizado el proceso de cocción por 80 min, afirmando que el remojo y la cocción tiene un impacto negativo en la retención de los compuestos fenólicos en el frijol. Para los resultados obtenidos en contenido de kaempferol, las concentraciones obtenidas en ambas variedades fueron relativamente bajas en comparación a lo reportado por Díaz-Batalla et al. (2006). Estos autores reportaron un contenido de kaempferol en las ascensiones de frijol entre 13.2-64.9 mg/100 g sin procesar y 11.4-18.9 mg/100 g luego del proceso de cocción. Para la variedad BIO101, este compuesto se redujo en su totalidad luego de las operaciones de hidratación y de cocción, independiente del tratamiento de hidratación implementado. Sin embargo, para la variedad Nima-Calima, se obtuvieron diferencias significativas entre el frijol sin procesar y el frijol procesado tanto por el tratamiento de HC y el tratamiento HCPU, siendo este último de mayor efecto en la reducción de la concentración del kaempferol. Otros compuestos como la miricetina y quercetina estuvieron ausentes en ambas variedades, debido a que algunos compuestos fenólicos sólo se encuentran en ciertos colores de la cubierta de la semilla. Giusti et al. (2017) estudiaron los perfiles fenólicos en cuarenta semillas de leguminosas. Los autores mostraron que la quercetina sólo se encontraba en aquellas semillas cuya composición de color de la testa estuviera presente el color negro. Por ejemplo, los autores encontraron una concentración de quercetina de 7.5 mg/kg en las semillas de la lenteja negra (black lentils), cuya testa es de color negro, y 2.0 mg/kg en las semillas de frijol caupí de cabecita negra (black eyed beans), cuyo color de testa es pálido, con una mancha negra alrededor del hilio de la semilla. En general, el contenido de compuestos fenólicos obedece a factores intrínsecos como el tipo de solución extractora y la metodología de extracción implementada, como factores extrínsecos como la variedad y la calidad de la semilla a analizar (Huber, 2016).

Azúcares. La rafinosa, la estaquiosa y la verbascosa son los oligosacáridos de interés en la evaluación nutricional del frijol común, ya que el sistema digestivo humano carece de enzimas gástricas (α -galactosidasa) para digerir estos tipos de oligosacáridos. Sin embargo, en el microbioma intestinal, existen varios microorganismos encargados de digerir estas moléculas, lo que genera como subproductos dióxido de carbono, hidrógeno y metano, generando la formación de flatos (Gasiński et al., 2022).

Para la variedad BIO101, el frijol procesado por HC, no tuvo efecto significativo en el contenido de verbascosa con respecto al frijol sin procesar ($p>0.05$). Sin embargo, para

esta misma variedad, el frijol procesado mediante HCPU si presentó diferencias significativas en los valores de concentración, presentando una disminución en la concentración en un valor de 12%. Por otro lado, el contenido de verbascosa luego de la preparación del frijol Nima-Calima por ambos tratamientos de hidratación, presentaron diferencias significativas con respecto al frijol sin procesar, obteniéndose una disminución en la concentración del oligosacárido con valores de 31% y 35% cuando el frijol fue hidratado mediante la HC e HCPU respectivamente.

La estaquiosa fue el oligosacárido de la familia de la rafinosa (RFO Raffinose family Oligosaccharides) que obtuvo mayores concentraciones para ambas variedades de frijol. Estos resultados concuerdan con los resultados reportados por Fan et al. (2015). Los autores analizaron ocho oligosacáridos diferentes en ocho variedades diferentes de leguminosas, entre ellas tres variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris*), y reportaron contenidos de 40.9-44.7 mg/g, 0.6-2.0 mg/g, y 4.1-6.1 mg/g para la estaquiosa, verbascosa y rafinosa respectivamente. Para la variedad BIO101, los tratamientos de hidratación presentaron diferencias significativas entre sí ($p < 0.05$), y se obtuvo una reducción de 29 y 15% cuando los frijoles fueron cocinados cuyos tratamientos fueron por HC y HCPU respectivamente. En cambio, para la variedad Nima-Calima, a pesar que hubo una reducción del 33 y 39% luego de la cocción del frijol mediante los tratamientos de HC y HCPU con respecto al frijol sin procesar, estos no presentaron diferencias significativas entre si ($p > 0.05$)

Los valores determinados en la concentración de la rafinosa, tanto para la variedad BIO101, como para la variedad Nima-Calima, se obtuvo una diferencia significativa en la reducción de este sacárido entre el frijol sin procesar y procesado ($p < 0.05$). Sin embargo, para ambas variedades, el tratamiento empleado no influyo en la magnitud de la reducción del compuesto, es decir, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$)

Estos resultados son similares a los reportados por Kotha et al. (2020), quienes analizaron 23 variedades diferentes de frijol común y encontraron que los oligosacáridos de mayor concentración eran la sacarosa y la estaquiosa, logrando ser parte de casi el 86 % de los azúcares totales. Algunos autores han demostrado que el remojo tiene efecto sobre la concentración de los azúcares. Ravoninjatovo et al. (2022), analizaron el efecto que tenía

el remojo a 30 °C sobre tres variedades de frijol común. Los autores encontraron que luego de 2 horas de remojo, la concentración de los azúcares rafinosa y estaquiosa disminuyeron entre el 5 y 58%, mientras que luego de 10 horas de remojo, se alcanzó un porcentaje de eliminación de estos α -galactósidos entre el 61 y 87%.

El contenido de sacarosa en el frijol sin procesar fue otro de los sacáridos que presentó mayor concentración en ambas variedades de frijol. Estos valores son cercanos a los reportados por Siva et al. (2019). Estos autores realizaron un estudio del contenido de carbohidratos en frijol común y reportaron valores entre 26 y 37 mg/g. Igualmente, el contenido de fructosa reportado abarcó un amplio rango de valores entre 1.7 y 16 mg/g. Para la variedad BIO101, se obtuvieron diferencias significativas en el contenido de sacarosa entre el frijol sin procesar y procesado, cuando la preparación se realizó mediante el tratamiento HC ($p < 0.05$). En cambio, cuando el tratamiento implementado fue la HCPU, no se presentaron cambios significativos en su concentración ($p > 0.05$). A pesar que esto, ambos tratamientos redujeron el contenido de este disacárido en 29 y 10% cuando el tratamiento fue por HC e HCPU. Por otro lado, la concentración de sacarosa en la variedad Nima-Calima, fue afectada significativamente por ambos tratamientos de hidratación y la disminución de la concentración de este disacárido fue notable estadísticamente con respecto a la concentración del frijol sin procesar ($p < 0.05$). Además, mediante una prueba pos-HOC, se determinó que ambos tratamientos de hidratación tuvieron el mismo efecto significativo en el procesamiento del frijol, indicando que tanto la HC, como la HCPU, afectan en igual magnitud la concentración del contenido de sacarosa.

En general, luego del proceso de preparación del frijol de la variedad BIO101, se obtuvo un porcentaje de eliminación de azúcares totales (sacarosa, glucosa, fructosa, verbascosa, estaquiosa y rafinosa) en un 29% cuando el tratamiento implementado fue la HC y una eliminación de azúcares totales de 16% cuando fue la HCPU. En cambio, en la preparación de la variedad Nima-Calima, se obtuvo una eliminación de azúcares totales de 38 y 30% cuando la hidratación fue HC e HCPU respectivamente. De acuerdo con los análisis de resultados expuestos, se puede evidenciar entonces que la HC presentó porcentajes mayores de eliminación de oligosacáridos en ambas variedades de frijol estudiadas frente a la HCPU. Estos resultados pueden tener relación con el tiempo de exposición al remojo, puesto que para la variedad BIO101, el t_{ha} fue 5 h mayor que el tiempo de hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido, mientras que para la variedad Nima-

Calima. El t_{ha} fue 1.7 h mayor que el tiempo de hidratación convencional con pretratamiento con ultrasonido, exponiendo que la aplicación del ultrasonido, al disminuir los tiempos de hidratación en granos y cereales, también ayuda a mejorar la retención de compuestos nutricionales en el procesamiento de frutas y verduras (Taha et al., 2023). Además, los t_c de la variedad Nima-Calima fueron más prolongados que los t_c determinados para la variedad BIO101, indicando que a mayores tiempos de cocción, mayores pérdidas de concentración de sacáridos, bien sea por migración desde la matriz sólida del alimento hacia el medio líquido, como también por cambios químicos en la estructura de estos compuestos a causa del tiempo de exposición al calor (Wood, 2017).

Ácido fítico. El contenido de ácido fítico en las semillas sin procesar fue de 15.6 mg/g y de 13.8 mg/g para la variedad BIO101 y para la variedad Nima-Calima respectivamente. Los valores obtenidos son aproximados con los valores reportados en la literatura científica. Huertas et al. (2022), reportaron el contenido de ácido fítico en seis genotipos mejorados de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) con un rango de variación entre 17.3-20.1 mg/g. Sin embargo, otros autores han reportados rangos de concentración que abarcan entre 3.4-28.7 mg/g (Ron & Antonio, 2015). Por otro lado, se evidenció una pérdida del contenido de ácido fítico para ambas variedades luego de las operaciones de hidratación y cocción. Para la variedad BIO101 el contenido de ácido fítico se redujo en un 19.5% cuando las semillas de frijol fueron hidratadas de manera convencional y un valor de 15.7% cuando las semillas fueron hidratadas de manera convencional con pretratamiento con ultrasonido. Estos valores presentaron diferencias significativas con respecto al frijol sin procesar ($p < 0.05$). Igualmente, para la variedad Nima-Calima se obtuvo una reducción de 14.6 y 19.2% en la HC e HCPU respectivamente. Contrario a la variedad BIO101, los tratamientos de hidratación no presentaron diferencias significativas en contenido de ácido fítico entre el frijol sin procesar y procesado. Algunas operaciones de eliminación del ácido fítico se realiza mediante procesos físicos como el descascarado y pulido en el caso de los de los cereales y la eliminación del cotiledón en el caso de las legumbres (Harsh et al., 2022). Otras operaciones como el remojo y la cocción también pueden considerarse procesos que ayudan a la reducción del ácido fítico y otros antinutrientes como las lectinas y los oxalatos (Shi et al., 2018). Los tratamientos de hidratación HC y HCPU no presentaron diferencias significativas entre sí, con respecto al contenido de ácido fítico ($p > 0.05$). Sin embargo, algunos autores han atribuido que el uso del ultrasonido aparte de mejorar la

velocidad de hidratación en el frijol, también minimiza la pérdida de sólidos solubles por medio de la lixiviación, entre ellos el ácido fítico y otros compuestos como azúcares, nitrógeno no proteico y algunos minerales. Otros autores reportan que la pérdida o disminución de estos compuestos nutricionales o antinutricionales están más ligados al tiempo de cocción y a la variedad de frijol estudiada (Ranjbari et al., 2013). El ácido fítico es otro de los compuestos que demuestra tanto propiedades antinutricionales, como beneficiosas. Se sabe que el ácido fítico es un transmisor de señales y un componente clave de varias vías metabólicas de la planta. Sin embargo, la naturaleza de esta molécula polianiónica, hace que tenga gran afinidad por los minerales cargados positivamente como el hierro, zinc, calcio, magnesio entre otros, convirtiéndolo en un quelante de micronutrientes esenciales, formando sales llamadas fitinas o fitatos, cuya insolubilidad hace que la biodisponibilidad de estos minerales sea más compleja por parte del consumidor (Pramitha et al., 2021). Paradójicamente, el ácido fítico en bajas concentraciones tiene efectos positivos para la salud como la acción protectora frente al cáncer, prevención de enfermedades cardiovasculares, reducción de formación de cálculos, entre otras (Margier et al., 2018). El efecto del ácido fítico sobre la biodisponibilidad de los minerales se estima por las relaciones molares entre el ácido fítico y el mineral (Pramitha et al., 2021).

$$\text{ácido fítico:mineral} = \frac{PA/MW_{PA}}{Min/MW_{min}}$$

Con PA el contenido de ácido fítico, MW_{PA} el peso molecular del ácido fítico 660 g/mol. Min el contenido de mineral y MW_{min} , el peso molecular del mineral (Fe=56, Zn=65, Ca=40).

Un valor de proporcionalidad por encima de 0.5, 0.4, y 1.5, son considerados como valores críticos donde el ácido fítico afecta la biodisponibilidad del mineral de calcio, hierro y zinc respectivamente (Hassan et al., 2011).

5.3 Conclusiones

El uso del ultrasonido en la hidratación del frijol no intervino en los cambios del contenido nutricional luego de las operaciones de preparación, comparado con respecto a los cambios obtenidos en el contenido nutricional mediante la hidratación convencional, por lo que se refuerza el uso e implementación de esta tecnología en la optimización de los procesos de hidratación en el frijol común. El aumento de concentración de algunos compuestos nutricionales en ambas variedades de frijol estudiadas es debido a la pérdida de sólidos disueltos en el agua de remojo y de cocción y está ligado al tiempo que toma cada una de estas operaciones.

5.4 Bibliografía

- Aravindakshan, S., Nguyen, T. H. A., Kyomugasho, C., Van Loey, A., & Hendrickx, M. E. (2022). The rehydration attributes and quality characteristics of 'Quick-cooking' dehydrated beans: Implications of glass transition on storage stability. *Food Research International*, 157(May). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111377>
- Beintema, J. J. S., Gallego-Castillo, S., Londoño-Hernandez, L. F., Restrepo-Manjarres, J., & Talsma, E. F. (2018). Scaling-up biofortified beans high in iron and zinc through the school-feeding program: A sensory acceptance study with schoolchildren from two departments in southwest Colombia. *Food Science and Nutrition*, 6(4), 1138–1145. <https://doi.org/10.1002/fsn3.632>
- Burgos-Edwards, A., Theoduloz, C., Márquez, K., Carrasco, B., & Schmeda-Hirschmann, G. (2023). Leaf development in Chilean bean landraces (*Phaseolus vulgaris*) affects phenolic composition and α -glucosidase inhibition. *Scientia Horticulturae*, 309(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111613>
- Cruz Balarezo, J., Camarena Mayta, F., Pierre Baudoin, J., Huaranga Joaquín, A., & Blas Sevillano, R. (2009). Evaluación agromorfológica y caracterización molecular de la ñuña (*Phaseolus vulgaris* L.). *Idesia*, 27(1), 29–40.
- da Conceição-dos Santos, L. F., Ruiz-Sánchez, E., & Jiménez-Osornio, J. J. (2022). Caracterización agro-morfológica de 20 cultivares de frijol caupí (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) en Yucatán, México. *Acta Universitaria*, 32, 1–12.
- De Almeida, A. J. B., Coelho, S. R. M., Schoeninger, V., & Christ, D. (2017). Chemical changes in bean grains during storage in controlled conditions. *Engenharia Agrícola*, 37(3), 529–540. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p529-540/2017>
- De Ron, M. A., Papa, R., Bitocchi, E., González, A. M., Debouck, D. G., Brick, M. A., Fourie, D., Marsolais, F., James, B., Geffroy, V., Mc Clean, P., Santalla, M., Lozano, R., Yuste-Lisbona, F., & Casquero, P. A. (2015). Common Bean. In *Grain Legumes* (pp. 1–36). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2797-5>

- Díaz-Batalla, L., Widholm, J. M., Fahey, G. C., Castaño-Tostado, E., & Paredes-López, O. (2006). Chemical components with health implications in wild and cultivated Mexican common bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *54*(6), 2045–2052. <https://doi.org/10.1021/jf051706l>
- Díaz, A. M., Caldas, G. V., & Blair, M. W. (2010). Concentrations of condensed tannins and anthocyanins in common bean seed coats. *Food Research International*, *43*(2), 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.014>
- Donsì, F., Marchese, E., Maresca, P., Pataro, G., Vu, K. D., Salmieri, S., Lacroix, M., & Ferrari, G. (2015). Green beans preservation by combination of a modified chitosan based-coating containing nanoemulsion of mandarin essential oil with high pressure or pulsed light processing. *Postharvest Biology and Technology*, *106*, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.006>
- Fabrizi, A. D. T., & Crosby, G. A. (2016). A review of the impact of preparation and cooking on the nutritional quality of vegetables and legumes. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *3*, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2015.11.001>
- Fan, P. H., Zang, M. T., & Xing, J. (2015). Oligosaccharides composition in eight food legumes species as detected by high-resolution mass spectrometry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *95*(11), 2228–2236. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6940>
- Ganesan, K., & Xu, B. (2017). Polyphenol-rich dry common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and their health benefits. *International Journal of Molecular Sciences*, *18*(11). <https://doi.org/10.3390/ijms18112331>
- Garretson, L., Tyl, C., & Marti, A. (2018). Effect of Processing on Antioxidant Activity, Total Phenols, and Total Flavonoids of Pigmented Heirloom Beans. *Journal of Food Quality*, *2018*. <https://doi.org/10.1155/2018/7836745>
- Gasiński, A., Kawa-Rygielska, J., Mikulski, D., & Kłosowski, G. (2022). Changes in the raffinose family oligosaccharides content in the lentil and common bean seeds during malting and mashing processes. *Scientific Reports*, *12*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22943-1>
- Ghafoor, M., Misra, N. N., Mahadevan, K., & Tiwari, B. K. (2014). Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). *Ultrasonics Sonochemistry*, *21*(1), 409–414. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.05.016>
- Giusti, F., Caprioli, G., Ricciutelli, M., Vittori, S., & Sagratini, G. (2017). Determination of fourteen polyphenols in pulses by high performance liquid chromatography-diode array detection (HPLC-DAD) and correlation study with antioxidant activity and colour. *Food Chemistry*, *2017*(221), 689–697.
- Gomes Basso Los, F., Ferreira Zielinski, A. A., Wojeicchowski, J. P., Nogueira, A., & Demiate, I. M. (2018). Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): whole seeds with complex chemical composition. *Current Opinion in Food Science*, *19*, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.010>

- Guild, G. E., Paltridge, N. G., Andersson, M. S., & Stangoulis, J. C. R. (2017). An energy-dispersive X-ray fluorescence method for analysing Fe and Zn in common bean, maize and cowpea biofortification programs. *Plant and Soil*, 419(1–2), 457–466. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3352-4>
- Güzel, D., & Sayar, S. (2012). Effect of cooking methods on selected physicochemical and nutritional properties of barlotto bean, chickpea, faba bean, and white kidney bean. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 89–95. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0260-0>
- Harsh, J., Shiv, N., Agrawal, K., & Siddique, K. H. M. (2022). Developing Climate Resilient Grain and Forage Legumes. In *Developing Climate Resilient Grain and Forage Legumes*. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-9848-4>
- Hassan, L. G., Umar, K. J., Dangoggo, S. M., & Maigandi, A. S. (2011). Anti-nutrient composition and bioavailability prediction as exemplified by calcium, iron and zinc in *Melocia corchorifolia* leaves. *Pakistan Journal of Nutrition*, 10(1), 23–28. <https://doi.org/10.3923/pjn.2011.23.28>
- Huber, K. (2016). Phenolic Acid, Flavonoids and Antioxidant Activity of Common Brown Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) Before and After Cooking. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 06(05), 1–7. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000551>
- Huertas, R., William Allwood, J., Hancock, R. D., & Stewart, D. (2022). Iron and zinc bioavailability in common bean (*Phaseolus vulgaris*) is dependent on chemical composition and cooking method. *Food Chemistry*, 387(December 2021), 132900. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132900>
- Hummel, M., Talsma, E. F., Taleon, V., Londoño, L., Brychkova, G., Gallego, S., Raatz, B., & Spillane, C. (2020). Iron, zinc and phytic acid retention of biofortified, low phytic acid, and conventional bean varieties when preparing common household recipes. *Nutrients*, 12(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/nu12030658>
- Kotha, R. R., Finley, J. W., & Luthria, D. L. (2020). Determination of Soluble Mono, Di, and Oligosaccharide Content in 23 Dry Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(23), 6412–6419. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00713>
- Latta, M., & Eskin, M. (1980). A Simple and Rapid Colorimetric Method for Phytate Determination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28(6), 1313–1315. <https://doi.org/10.1021/jf60232a049>
- Lehrfeld, J. (1989). High-performance liquid chromatography analysis of phytic acid on a pH-stable, macroporous polymer column. *Cereal Chemistry*, 66(1986), 510–515. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=6733043>
- Lin, L.-Z., Harnly, J. M., Pastor-Corrales, M. S., & Luthria, D. L. (2008). The polyphenolic profiles of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, 107(1), 399–410. <https://doi.org/10.1038/jid.2014.371>
- Margier, M., Georgé, S., Hafnaoui, N., Remond, D., Nowicki, M., Du Chaffaut, L., Amiot,

- M. J., & Reboul, E. (2018). Nutritional composition and bioactive content of legumes: Characterization of pulses frequently consumed in France and effect of the cooking method. *Nutrients*, *10*(11), 1–12. <https://doi.org/10.3390/nu10111668>
- Nielsen, S. S. (2010). Determination of moisture content. In *Food Analysis Laboratory Manual, Food Science Texts Series, High Performance Liquid Chromatography* (pp. 145–149). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1463-7>
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., & Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice. *Food Chemistry*, *233*, 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.114>
- Ordóñez-Santos, L. E., Velasco-Arango, V. A., & Hleap-Zapata, J. I. (2022). Ultrasound-assisted extraction of total carotenoids in papaya epicarp and its application in Frankfurt sausage. *Ciencia e Agrotecnología*, *46*. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202246006722>
- Pan, L., Zhu, Q., Lu, R., & McGrath, J. M. (2015). Determination of sucrose content in sugar beet by portable visible and near-infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, *167*, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.117>
- Perera, D., Devkota, L., Garnier, G., Panozzo, J., & Dhital, S. (2023). Hard-to-cook phenomenon in common legumes: Chemistry, mechanisms and utilisation. *Food Chemistry*, *415*(September 2022), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135743>
- Porch, T. G., Cichy, K., Wang, W., Brick, M., Beaver, J. S., Santana-Morant, D., & Grusak, M. A. (2017). Nutritional composition and cooking characteristics of tepary bean (*Phaseolus acutifolius* Gray) in comparison with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, *64*(5), 935–953. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0413-0>
- Pramitha, J. L., Rana, S., Aggarwal, P. R., Ravikesavan, R., Joel, A. J., & Muthamilarasan, M. (2021). Diverse role of phytic acid in plants and approaches to develop low-phytate grains to enhance bioavailability of micronutrients. *Advances in Genetics*, *107*, 89–120. <https://doi.org/10.1016/bs.adgen.2020.11.003>
- Proctor, J. R., & Watts, B. M. (1987). Development of a Modified Mattson Bean Cooker Procedure Based on Sensory Panel Cookability Evaluation. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, *20*(1), 9–14. [https://doi.org/10.1016/s0315-5463\(87\)70662-2](https://doi.org/10.1016/s0315-5463(87)70662-2)
- Qureshi, A. M. I., Dar, Z. A., & Wani, S. H. (2019). Quality breeding in field crops. *Quality Breeding in Field Crops*, 1–275. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04609-5>
- Ranjbari, A., Kashaninejad, M., Aalami, M., Khomeiri, M., & Gharekhani, M. (2013). Effect of ultrasonic pre-treatment on water absorption characteristics of chickpeas (*Cicer arietinum*). *Latin American Applied Research*, *43*(2), 153–159.
- Ravoninjatovo, M., Ralison, C., Servent, A., Morel, G., Achir, N., Andriamazaoro, H., &

- Dornier, M. (2022). Effects of soaking and thermal treatment on nutritional quality of three varieties of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from Madagascar. *Legume Science*, 4(4). <https://doi.org/10.1002/leg3.143>
- Ren, Y., He, Q., Ma, X., & Zhang, L. (2017). Characteristics of color development in seeds of brown- and yellow-seeded heading Chinese cabbage and molecular analysis of Brsc, the candidate gene controlling seed coat color. *Frontiers in Plant Science*, 8(August), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01410>
- Reyes-Moreno, C., & Paredes-López, O. (1993). Critical Reviews in Food Science and Nutrition Hard - to - cook phenomenon in common beans — A review Hard-to-Cook Phenomenon in Common Beans — A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(February 2013), 227–286.
- Sáez-Plaza, P., Michałowski, T., Navas, M. J., Asuero, A. G., & Wybraniec, S. (2013). An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part I. Early History, Chemistry of the Procedure, and Titrimetric Finish. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43(4), 178–223. <https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751786>
- Shi, L., Arntfield, S. D., & Nickerson, M. (2018). Changes in levels of phytic acid, lectins and oxalates during soaking and cooking of Canadian pulses. *Food Research International*, 107(2017), 660–668. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.056>
- Siddiq, M., Masood, S. B., & Sultan, M. T. (2012). Dry Beans and Pulses Production, Processing and Nutrition. *Dry Beans and Pulses Production, Processing and Nutrition*, 545–564. <https://doi.org/10.1002/9781118448298>
- Singla, M., & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105506. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506>
- Siva, N., Thavarajah, P., Kumar, S., & Thavarajah, D. (2019). Variability in prebiotic carbohydrates in different market classes of chickpea, common bean, and lentil collected from the american local market. *Frontiers in Nutrition*, 6(April), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00038>
- Stangoulis, J., & Sison, C. (2008). Protocolos de Muestreo en Cultivos para Análisis de Micronutrientes. *Monografías Técnicas HarvestPlus*, 20.
- Taha, A., Mehany, T., Pandiselvam, R., Anusha Siddiqui, S., Mir, N. A., Malik, M. A., Sujayasree, O. J., Alamuru, K. C., Khanashyam, A. C., Casanova, F., Xu, X., Pan, S., & Hu, H. (2023). Sonoprocessing: mechanisms and recent applications of power ultrasound in food. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–39. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2161464>
- Tharanathan, R. N., & Mahadevamma, S. (2003). Grain legumes - A boon to human nutrition. *Trends in Food Science and Technology*, 14(12), 507–518. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.002>
- Ulloa, J. A., Enríquez López, K. V., Contreras Morales, Y. B., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, 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*, 13(4), 588–596. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1024173>

Wainaina, I., Wafula, E., Sila, D., Kyomugasho, C., Grauwet, T., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2021). Thermal treatment of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Factors determining cooking time and its consequences for sensory and nutritional quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3690–3718. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12770>

Wood, J. A. (2017). Evaluation of cooking time in pulses: A review. *Cereal Chemistry*, 94(1), 32–48. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-16-0127-FI>

Xu, B., & Chang, S. K. C. (2009). Total phenolic, phenolic acid, anthocyanin, flavan-3-ol, and flavonol profiles and antioxidant properties of pinto and black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(11), 4754–4764. <https://doi.org/10.1021/jf900695s>