

De acuerdo con la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR

Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 1996,

México.

Capítulo II

De la Limitación a los Derechos Patrimoniales

Artículo 148.-

Las obras literarias y artísticas ya divulgadas podrán utilizarse, siempre que no se afecte la explotación normal de la obra, sin autorización del titular del derecho patrimonial y sin remuneración, citando invariablemente la fuente y sin alterar la obra, sólo en los siguientes casos:

I. Cita de textos, siempre que la cantidad tomada no pueda considerarse como una reproducción simulada y sustancial del contenido de la obra;

II. Reproducción de artículos, fotografías, ilustraciones y comentarios referentes a acontecimientos de actualidad, publicados por la prensa o difundidos por la radio o la televisión, o cualquier otro medio de difusión, si esto no hubiere sido expresamente prohibido por el titular del derecho;

III. Reproducción de partes de la obra, para la crítica e investigación científica, literaria o artística;

IV. *Reproducción por una sola vez, y en un sólo ejemplar, de una obra literaria o artística, para uso personal y privado de quien la hace y sin fines de lucro. Las personas morales no podrán valerse de lo dispuesto en esta fracción salvo que se trate de una institución educativa, de investigación, o que no esté dedicado a actividades mercantiles;*

V. *Reproducción de una sola copia, por parte de un archivo o biblioteca, por razones de seguridad y preservación, y que se encuentre agotada, descatalogada y en peligro de desaparecer.*

Si usted es el autor de la obra y no desea que sea visualizada a través de este medio, favor de notificarlo por escrito a:

Universidad Autónoma de Nayarit. Dirección de Desarrollo Bibliotecario. Edificio de la Biblioteca Magna. Ciudad de la Cultura Amado Nervo s/n. Col. Los Fresnos. CP. 63190. Tepic, Nayarit.

O bien vía correo electrónico a: ddb@uam.edu.mx

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS



CINÉTICAS DE DESHIDRATACIÓN Y REHIDRATACIÓN DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) AZUFRAO ENTERO INSTANTÁNEO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
BIOLÓGICO AGROPECUARIAS EN EL ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

PRESENTA

JUAN ALBERTO RESENDIZ VAZQUEZ

XALISCO, NAYARIT; SEPTIEMBRE DE 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
ÁREA DE CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS Y PESQUERA
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS

CBAP/347/13

Xalisco, Nayarit; 22 de agosto de 2013

Ing. Alfredo González Jáuregui
Director de Administración Escolar
P r e s e n t e .

Con base al oficio de fecha 15 de agosto de 2013, enviado por los **CC. Dr. José Armando Ulloa, Dr. Rosendo Balois Morales, Dr. José Carmen Ramírez Ramírez, Dr. José Roberto Gómez Aguilar y M. en C. Karina Mejía Martínez**, donde se nos indica que el trabajo de tesis cumple con lo establecido en forma y contenido, y debido a que ha cumplido con los demás requisitos que pide el Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Nayarit, se autoriza al **C. Juan Alberto Resendiz Vazquez**, continúe con los trámites necesarios para la presentación del examen de grado de Maestría.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
"Por lo Nuestro a lo Universal"



Dr. J. Diego García Paredes
Coordinador del Posgrado

C.c.p.-Expediente.
JDGP/raf.

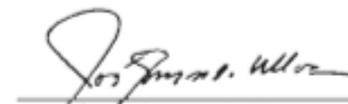
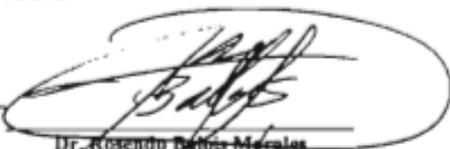
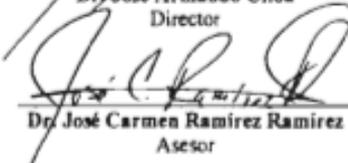
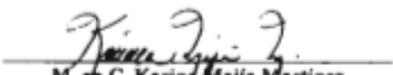
Xalisco, Nayarit, 15 de agosto de 2013.

Dr. Juan Diego Garcia Paredes
Coordinador del Posgrado en Ciencias Biológicas Agropecuarias
Universidad Autónoma de Nayarit
Presente:

Los que suscribimos, integrantes del Comité Tutorial del QFB. Juan Alberto Resendiz Vazquez, declaramos que hemos revisado la tesis titulada *Cinéticas de deshidratación y rehidratación de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) azufrado entero instantáneo y aprobamos que puede ser presentada para aspirar al grado de Maestro en Ciencias Biológico Agropecuarias con la opción terminal en Ciencias Agrícolas.*

Atentamente

El Comité Tutorial

 _____ Dr. José Armando Ulloa Director	 _____ Dr. Rosendo Balón Morales Codirector
 _____ Dr. José Carmen Ramírez Ramírez Asesor	 _____ Dr. José Roberto Gómez Aguilar Asesor
 _____ M. en C. Karina Mejía Martínez Asesor	

DEDICATORIAS

A mis padres,

a mi esposa,

a mis hijos.

AGRADECIMIENTOS

A Dr. José Armando Ulloa, por todo su apoyo y confianza en la dirección de esta investigación.

A la M. en C. Petra Rosas Ulloa, por todo el apoyo que siempre me ha brindado en las distintas etapas de mi formación académica y profesional.

A Dr. Rosendo Balois Morales, por todo su apoyo y tutoría brindada para la realización del presente estudio.

A Dr. José Carmen Ramírez Ramírez, por todo su apoyo y tutoría brindada para la realización del presente estudio.

A Dr. José Roberto Gómez Aguilar, por su apoyo y tutoría brindada para la realización del presente estudio.

A la M. en C. Karina Mejía Martínez, por su apoyo y tutoría brindada para la realización del presente estudio.

A Dr. Hugo Espinosa Andrews por su apoyo y tutoría brindada en mi estancia de investigación realizada en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

La presente tesis se realizó en el Centro de Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma de Nayarit, formando parte del proyecto "2649 Caracterización fisicoquímica, microbiológica, sensorial y funcional de las tres principales variedades de frijol producidas en el estado de Nayarit", bajo el patrocinio del Promep y la dirección del Dr. José Armado Ulloa.

Durante el desarrollo de la tesis, se contó con el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), con número de becario 418963.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
2.1 Generalidades del frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	2
2.2 Estructura de la semilla	3
2.3 Clasificación taxonómica	4
2.4 Diversidad de frijol	4
2.5 Composición nutrimental del frijol	7
2.5.1 Proteínas y aminoácidos	8
2.5.2 Carbohidratos	9
2.5.3 Lípidos	10
2.5.4 Minerales y vitaminas	11
2.5.5 Factores antinutricionales	11
2.6 Producción mundial de frijol	15
2.6.1 Aspectos relevantes del mercado internacional	15
2.6.2 Principales países productores, exportadores e importadores de frijol	15
2.7 El frijol en México	16
2.7.1 Importancia	16
2.7.2 Regiones productoras de frijol en México	17
2.7.3 Consumo de frijol	18
2.7.4 Factores que afectan el consumo de frijol	19
2.8 El frijol en Nayarit	20
2.8.1 Producción de frijol en Nayarit	20
2.9 Comercialización de frijol	21
2.10 Deshidratación de alimentos	22
2.10.1 Deshidratación	22
2.10.2 Ventajas y desventajas	23
2.10.3 Métodos de deshidratación	24
2.10.4 Deshidratador de bandejas	28
2.10.5 Factores que influyen en la velocidad de deshidratación	27

2.10.6	Parámetros cinéticos en deshidratación	28
2.10.7	Frijol deshidratado	30
2.10.8	Rehidratación de alimentos	31
2.10.9	Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación	33
2.10.10	Parámetros cinéticos en rehidratación	35
2.10.11	Ecuación de Arrhenius	35
III.	JUSTIFICACIÓN	37
IV.	HIPÓTESIS	37
V.	OBJETIVOS	38
VI.	MATERIALES Y MÉTODOS	39
6.1	Material vegetal.....	39
6.2	Deshidratación	39
6.3	Composición proximal y análisis fisicoquímicos de semillas de frijol	42
6.4	Determinación de las características físicas de las semillas.....	42
6.5	Determinación del grado de cocción	43
6.6	Rehidratación.....	44
6.7	Análisis estadístico	48
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	49
7.1	Cinética de deshidratación.....	49
7.2	Efecto del método de deshidratación sobre la calidad de frijol precocido deshidratado.....	54
7.3	Propiedades físicas de frijol precocido deshidratado.....	56
7.4	Composición proximal y análisis fisicoquímicos de semillas.....	58
7.5	Propiedades térmicas de frijol precocido deshidratado	59
7.6	Cinéticas de rehidratación.....	60
7.7	Constante de velocidad de hidratación	65
7.8	Difusividad efectiva (D_{ef}) y su relación con la energía de activación (E_a)	67
VIII.	CONCLUSIONES	71
IX.	LITERATURA CITADA.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Titulo	Página
1	Clasificación taxonómica del frijol.....	4
2	Clasificación por color de frijol común.....	6
3a,b	Características químicas y nutrimentales del frijol común.....	7
4	Aminoácidos presentes en semillas de frijol <i>Phaseolus Vulgaris</i> L.....	9
5	Principales factores antinutricionales presentes en frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	13
6	Propiedades funcionales de algunos factores antinutricionales.....	14
7	Principales variedades de frijol consumidas en México.....	18
8	Actividad de agua (a_w) a la cual crecen algunos microorganismos en alimentos.....	23
9	Procesos para remover el agua de un alimento.....	25
10	Métodos de deshidratación más utilizados en alimentos.....	26
11	Principales indicadores de la pérdida de calidad del frijol durante deshidratación.....	30
12	Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de deshidratación.....	41
13	Diseño de experimento para deshidratación.....	48
14	Parámetros cinéticos obtenidos para el modelo de Page.....	51
15a,b	Parámetros cinéticos y estimadores estadísticos de los diferentes modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales de deshidratación.....	52
16	Efecto del proceso de deshidratación sobre la calidad final de frijol precocido deshidratado.....	54

Continuación

Tabla	Título	Página
17	Características físicas de semillas de frijol crudo y precocido deshidratado.....	57
18	Composición química proximal y algunas características fisicoquímicas de semillas de frijol crudo y precocido deshidratado.....	58
19	Propiedades de rehidratación de semillas de frijol precocido deshidratado.....	61
20	Características de absorción de agua de semillas de frijol precocidas deshidratadas siguiendo el modelo de Peleg.....	64
21	Características de absorción de agua de semillas de frijol precocidas deshidratadas siguiendo el modelo de Primer Orden.....	65
22	Características de absorción de agua de semillas de frijol precocidas deshidratadas siguiendo el modelo Sigmoide.....	67
23	Coefficiente de difusión (D_{eff}) y energía de activación (E_a) de hidratación.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Estructura de la semilla de frijol.....	3
2	Deshidratador de bandejas con circulación y flujo de aire paralelo al producto.....	28
3	Principales indicadores de la pérdida de calidad de frijol precocido durante el procedimiento de deshidratación.....	31
4	Relación del contenido de humedad en función del tiempo para semillas frijol precocido.....	49
5	Valores predichos y experimentales del contenido de humedad de semillas de frijol precocido deshidratado.....	50
6	Termograma de semillas de frijol sin cocción y después de ser sometido al proceso térmico de escaldado, remojo y cocción.....	59
7	Efecto de la temperatura en la absorción de agua de frijol precocido deshidratado.....	62
8	Gráfica de Arrhenius del efecto de la temperatura de remojo sobre la difusividad efectiva de semillas de frijol precocido deshidratado.....	70

RESUMEN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es un alimento que se consume en todas las regiones del mundo, es fuente importante de proteínas, carbohidratos, minerales, así como de fitoquímicos biológicamente activos benéficos para la salud. Actualmente se promueve el desarrollo de productos a base de frijol, como una oportunidad de mercado en la industria de alimentos, especialmente de aquellos de alto valor agregado como el frijol precocido deshidratado. Sin embargo, en la producción de dicho alimento, el principal problema es la pérdida estructural de la semilla, expresada por la abertura de cotiledones (AC) y/o separación de cotiledones (SC), provocada por la alta velocidad de deshidratación. El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento cinético de la deshidratación del frijol precocido y de su rehidratación, así como del ajuste de los datos experimentales a diferentes modelos matemáticos. La deshidratación de las semillas se realizó a temperaturas de 25 y 30°C con velocidades de aire de 0.5 y 1.0 m·s⁻¹, después de ser sometidas a escaldado, hidratación y cocción. De acuerdo con las cinéticas de deshidratación, el modelo de Page fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales, con valores de R² de 0.99 y error promedio porcentual de 2.31 a 3.53. En ninguno de los tratamientos de deshidratación se observó pérdida estructural por SC, mientras que la AC varió de 2.9 a 5.9%, obteniéndose el valor más bajo para las condiciones de 25°C y 0.5 m·s⁻¹. En el proceso de rehidratación, el modelo de Primer orden presentó contenidos de humedad de saturación estrechamente cercanos a los valores experimentales y la energía de activación calculada fue de 23.60 a 30.48 KJ·mol⁻¹. La deshidratación de frijol precocido a 25°C y 0.5 m·s⁻¹, produce semillas con pérdida estructural baja.

ABSTRACT

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a food consumed in all regions of the world. Beans are good source of protein, carbohydrates, minerals and biologically active phytochemicals beneficial to promote the health. Because of their nutritional and health-promoting properties, the development of value-added bean-based products for new market opportunities in the functional food and nutraceutical industry is being promoted. However, high rate of structural defects (splitting and bursting) of the finished bean products discourage their acceptance by consumers and end-users. The aim of this research was to study the kinetic behavior of dehydration and rehydration of precooked whole bean, as well as the fit of the experimental data to different mathematical models. The dehydration of bean was carried out at 25 and 30°C with air rates of 0.5 and 1.0 m s⁻¹, after being subjected to blanching, hydration and cooking. The Page's model was the best fit to the experimental data, with R² values of 0.99 and average error percentage of 2.31 to 3.53. Bursting structural loss was not observed in any of the treatments, whereas the splitting ranged from 2.9 to 5.9%, with the lowest value for the conditions of 25°C and 0.5 m s⁻¹. The first order rehydration model showed values of saturation moisture content closely nearby to the experimental, while the values of the activation energy ranged from 23.60 to 30.48 kJ mol⁻¹. The dehydration of precooked beans at 25°C and 0.5 m s⁻¹ produced precooked dehydrated beans with low rate of structural defects.

I. INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa que forma parte de la dieta básica de los mexicanos y se ha utilizado en la preparación de comida y platillos tradicionales por muchos años. Es una fuente importante de proteínas, carbohidratos complejos, fibra y minerales, así como de fitoquímicos biológicamente activos benéficos para la salud. Su consumo tiene efectos en el control de enfermedades como diabetes, cáncer de colon y obstrucción de arterias coronarias, motivo por el cual es uno de los alimentos más importantes para la prevención de muchas enfermedades y padecimientos presentes en el perfil epidemiológico de la población mexicana. De acuerdo a las regiones geográficas de producción en México, las variedades de frijol con mayor preferencia de consumo son el azufrado, mayocoba, negro jamapa, peruano, flor de mayo y flor de junio. En México, el frijol se cultiva en casi todos los estados destacando por su producción Zacatecas, Durango, Sinaloa, Chihuahua y Nayarit; este último, de acuerdo al análisis de la cadena de valor del frijol (2012), logró una producción de 75,754 toneladas con un valor de 956 millones de pesos. Actualmente la comercialización de frijol en México se enfrenta a modificaciones importantes ante una sociedad cambiante, la cual está ejerciendo presiones diversas de la cadena de producción, comercialización, transformación y consumo de este alimento.

Por ello, actualmente se promueve la industrialización de frijol como una oportunidad de mercado en la industria de alimentos, especialmente de productos de alto valor agregado como el frijol precocido deshidratado instantáneo. Sin embargo, en la producción de frijol precocido deshidratado, el principal problema a resolver es la pérdida de calidad o de la integridad de la semilla, expresada por la abertura de cotiledones (AC) y/o separación de cotiledones (SC), provocada por la alta velocidad de deshidratación. Aún cuando se afirma que la deshidratación a baja temperatura y baja velocidad de aire puede reducir la tasa de AC y SC, es necesario establecer las condiciones de deshidratación adecuadas para obtener frijol precocido deshidratado de aceptable calidad.

II. ANTECEDENTES

2.1 Generalidades del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

El frijol es un alimento de alto valor nutricional que se consume en todas las regiones del mundo; es una buena fuente de carbohidratos, proteína, fibra dietética, principalmente fibra insoluble, vitaminas (tiamina, riboflavina niacina, piridoxina, ácido fólico) y en menor proporción de minerales como calcio, hierro, cobre, zinc, fósforo, potasio y magnesio, mientras que la cubierta de la semilla contiene flavonoides y polifenoles que actúan como antioxidantes (Martínez-Meyer *et al.*, 2013).

La inclusión de frijol en la dieta diaria presenta efectos benéficos en el control y prevalencia de enfermedades metabólicas tales como: *diabetes mellitus*, arterosclerosis, inflamaciones intestinales y cáncer de colon (Reynoso-Camacho *et al.*, 2007; Tharanalan y Mahadevamma, 2003). Sin embargo, ha sido reportado que dicho efecto protector de las semillas en la prevención de enfermedades, tales como cáncer, puede no ser completamente asociado a la fibra dietética, pero si a compuestos fenólicos y otros compuestos no nutritivos (Oomah *et al.*, 2006).

México se ha reconocido como el más probable centro de origen del frijol, o al menos, como el centro primario de diversificación (Voyses, 2000). Algunos de los hallazgos arqueológicos en México y Sudamérica indican que se conocía desde hace algunos 5000 años antes de Cristo (Ulloa *et al.*, 2011).

Debido al interés del hombre por esta leguminosa, la selección hecha por las culturas precolombinas generó un gran número de variedades y en consecuencia de diferentes nombres comunes dentro de los que destacan: frijol, poroto, caraota, judía, alubia, habichuela, nuña, vainita, mientras que los nahuatl lo nombraban eti y ayocotl, los mayas x-kalil-bul, los italianos fiesole, en Francia haricot y en EEUU beans (Arias-Tapia, 2002).

2.2 Estructura de la semilla

La semilla está compuesta por la testa o pericarpio, el hilio, el micrópilo y los cotiledones (figura 1). La capa externa de la semilla es la testa o pericarpio y está compuesta de una cutícula delgada, la cual cubre una capa de células de pared gruesa llamadas células empalizadas (Carmona-García, 2005). El hilio es una cicatriz ovalada y se puede observar en la parte media de la superficie de la semilla. De igual manera, el micrópilo es una pequeña abertura de la testa junto al hilio (Arias-Restrepo *et al* 2007). En cuanto a los cotiledones, constituyen la parte principal del frijol con respecto a su peso y volumen, mostrando una estructura altamente organizada, siendo su principal función la reserva de nutrientes tales como proteínas y carbohidratos (Camacho-Espinoza *et al.*, 2010; Bello-Pérez y Paredes-López, 2009).

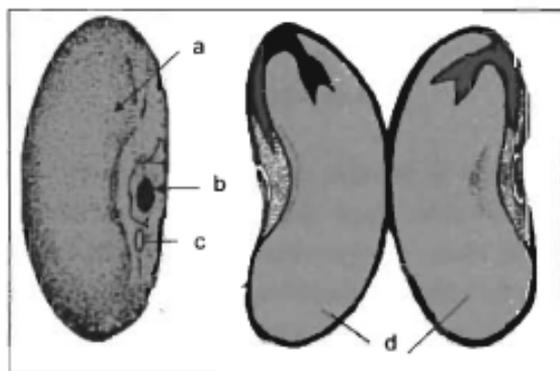


Figura 1. Estructura de la semilla de frijol: a) Testa o pericarpio, b) Hilio, c) Micrópilo, d) Cotiledones. Fuente: Carmona-García, 2005 (modificado).

2.3 Clasificación taxonómica

Taxonómicamente, el frijol corresponde a la especie del género *Phaseolus* (tabla 1). Su nombre completo es *Phaseolus vulgaris* L., asignado por Linneo en 1753; actualmente esta clasificación sigue siendo utilizada.

Tabla 1. Clasificación taxonómica del frijol

Familia	<i>Leguminosae</i>
Subfamilia	<i>Papilionoideae</i>
Tribu	<i>Phaseoleae</i>
Subtribu	<i>Phaseolinae</i>
Género	<i>Phaseolus</i>
Especie	<i>Phaseolus vulgaris</i> Linneo

2.4 Diversidad de frijol

En el mundo existen alrededor de 150 especies de frijol, pero en México se encuentran disponibles 50 variedades (Reyes *et al.*, 2008). Para su clasificación se pueden tomar diversos criterios. Por su consumo como semilla seca y como semilla y vaina verde. Desde el punto de vista agronómico se utilizan características como la duración del periodo vegetativo y se habla de variedades precoces o tardías. En cuanto a la reacción al fotoperíodo se dice de variedades sensibles, insensibles o neutras. En lo que respecta a factores limitantes de la producción se ubica a las variedades en al menos las resistentes y susceptibles.

Aunque a nivel mundial todas las variedades de frijol quedan incluidas en los criterios anteriormente señalados, a nivel práctico, los países en particular clasifican a sus variedades de frijol de acuerdo a las características de su semilla, en especial en lo relativo a su tamaño y color.

Por todo lo anterior, a continuación se describen algunas de las clasificaciones más importantes de las semillas de frijol:

- A. **Tamaño.** Kaptso *et al.* (2008) y Allende *et al.* (2006) reportan que el tamaño del frijol se determina por el peso de 100 semillas de frijol y de esta manera se consideran al menos tres tipos: chicos (< 25 g/100 semillas), medianos (25 a 40 g/100 semillas) y grandes (> 40 g/100 semillas).
- B. **Forma.** Redondo, ovalado u ovoide, elíptico, romboide, arriñonado, prismático y cilíndrico (Voysest, 2000).
- C. **Color.** Existen nueve grupos de colores correspondientes a siete familias y dentro de cada familia se incluye una clasificación de tonalidades (tabla 2).
- D. **Grado de madurez.** Semilla seca, verde y verde en vaina (Velásquez y Giraldo, 2005).
- E. **Grado de calidad.** Sousa-Alves *et al.* (2004) clasificaron el grado de calidad de las semillas cosechadas de frijol en cinco tipos, los cuales son: tipo 1 (tolerancias máximas de 4 % de semillas dañadas), tipo 2 (tolerancias máximas del 8 % de semillas dañadas), tipo 3 (tolerancias máximas del 12 % de semillas dañadas), tipo 4 (tolerancias máximas del 16 % de semillas dañadas) y tipo 5 (tolerancias máximas del 20 % de semillas dañadas).
- G. **Especies más cultivadas.**

De las 150 especies que existen, el hombre sólo ha logrado domesticar cuatro especies de importancia económica y cultural para los productores y consumidores de frijol (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2001) las cuales son:

- a) *Phaseolus vulgaris* L. (frijol común)
- b) *Phaseolus coccineus* L. (frijol ayocote, "runner bean")
- c) *Phaseolus lunatus* L. (frijol comba o pastashete)
- d) *Phaseolus acutifolius* Gray (frijol tepari o escomite)

Tabla 2. Clasificación por color de frijol común.

Grupo de color	Tipo de variedad	País
Blanco	Panamito	Perú, Ecuador
	Navy Bean	Estados Unidos
	Alubia	Argentina
Crema ("beige")	Carioca	Brasil
	Pinto	México
	Ojo de cabra	México
	Bayo	México, Perú, Chile, Ecuador
Amarillo	Canario	Perú, México
	Azufrado	México
	Amarelo	Brasil
Café-marrón	Ricopardo	Brasil
	Redlamds	Australia
	Chumbinbo	Brasil
Rosado	Rosinha	Brasil
	Rosita	México
	Flor de mayo	México
Rojo	Calima	Colombia
	Zamorano	Honduras
Morado	Sangretero	Colombia
	Roxinho	Brasil
Negro	Jamapa	México
	Porrillo	El Salvador
Otros	Tórtolas	Chile

Fuente: Voysest, 2000.

2.5 Composición nutrimental del frijol

El frijol es un alimento completo, al contener simultáneamente proteínas, carbohidratos, fibra, lípidos, vitaminas, minerales y antioxidantes. Todos estos componentes biológicamente activos, poseen propiedades benéficas para la salud (Batista *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010). No obstante, el frijol presenta factores antinutricionales que pueden tener efectos adversos sobre la nutrición humana. Los principales factores antinutricionales en el frijol son: ácido fítico, taninos, ácidos fenólicos e inhibidores de enzimas tales como la tripsina (Mohamed *et al.*, 2011).

En la tabla 3 se muestran las características químicas y nutrimentales del frijol común. En los siguientes puntos se describe cada uno de estos componentes y su efecto en la salud humana.

Tabla 3a. Características químicas y nutrimentales del frijol común.

Característica	Contenido	Requerimiento mínimo diario
Composición química (%)		
Proteína	14 – 33	
Lípidos	1.5 – 6.2	
Fibra total	14 – 19	
Insoluble	10.1 – 13.4	
Soluble	3.1 – 7.6	
Cenizas	2.9 – 4.5	
Carbohidratos	52 – 76	
Calidad de la proteína		
Digestibilidad (%)	52 – 75	
Aminoácidos esenciales (g/100 g proteína)		
Fenilalanina + tirosina	5.3 – 8.2	6.3
Isoleucina	2.8 – 5.8	2.8
Leucina	4.9 – 9.9	6.6
Lisina	6.4 – 7.6	5.8
Metionina + cisteína	1.2 – 1.5	2.5
Treonina	4.4 – 7.0	3.4
Valina	4.5 – 6.7	1.1

Fuente: Guzmán-Maldonado, 2002.

Tabla 3b. Características químicas y nutrimentales del frijol común.

Característica	Contenido	Requerimiento Mínimo diario
Minerales (mg/100 g)		
Calcio	9 – 200	800 – 1000
Fósforo	460	800 – 1000
Hierro	3.8 – 7.6	15
Magnesio	200	300 – 400
Zinc	2.2 – 4.4	15
Vitaminas (mg/100 g)		
Triamina (B ₁)	0.86 – 1.14	1.5
Niacina (B ₃)	1.16 – 2.68	0.019
Ácido fólico	0.17 – 0.58	0.4
Antinutrientes		
Oligosacáridos (mg/g)	25 – 50	
Taninos (mg eq.cat/g)	9.6 – 131.4	
Inhibidores de tripsina (UIT/mg)	13 – 29	
Ácido fitico (%)	0.6 – 2.7	
Lectinas (%)	1 – 5	

Fuente: Guzmán-Maldonado, 2002.

2.5.1 Proteínas y aminoácidos

El frijol es una importante fuente de proteínas y su contenido varía del 16 al 30 % dependiendo de la variedad, la zona de cultivo y otros factores (Camacho-Espinoza *et al.*, 2010). Sus principales proteínas son la faseolina, lectinas y argelinas. La faseolina representa la principal fracción proteínica de reserva y representa del 40 a 60 % de la proteína total; por su parte, las lectinas y argelinas son muy parecidas, aunque la principal diferencia radica en que las argelinas contienen más metionina, cisteína y residuos básicos de aminoácidos y residuos glicosilados (Carmona-García, 2005). No obstante, Arias-Tapia (2002) reporta que las semillas de frijol son deficientes en aminoácidos azufrados como metionina, cisteína y triptófano. Sin

embargo, aunque la cantidad de aminoácidos azufrados es pequeña, satisface los requerimientos mínimos necesarios (Mubarak, 2005).

La importancia del consumo de frijol con respecto a otros alimentos de alto valor como cereales, radica en su aporte de aminoácidos (tabla 4). La calidad de la proteína del frijol cocido, puede llegar a ser hasta del 70 %, comparada con una proteína testigo de origen animal a la que se le asigna el 100 % (Ulloa *et al.*, 2011).

Tabla 4. Aminoácidos presentes en semillas de frijol *Phaseolus vulgaris* L.

Aminoácido	(g/100 g)
Alanina	2.9
Arginina	6.3
Asparagina	10.4
Cisteina *	0.8
Glutamina	17.9
Glicina	3.7
Lisina *	7.6
Metionina*	1.3
Fenilalanina*	5.8
Histidina	2.9
Isoleucina*	6.3
Leucina*	9.6
Prolina	4.2
Serina	5.8
Treonina*	5.0
Triptófano*	0.8
Tirosina	4.2
Valina*	6.7

Fuente: Ribeiro *et al.*, 2010. * Aminoácidos esenciales.

2.5.2 Carbohidratos

Los carbohidratos forman del 50 al 60 % del peso seco de la semilla de frijol (Bello-Pérez y Paredes-López, 2009). Los polisacáridos más importantes en el frijol son el almidón (35 - 60 % del peso seco de la semilla), fibra dietética, polisacáridos de la pared celular (pectinas, arabinogalactanos y xiloglucanos) y oligosacáridos

(rafínosa, estaquiosa y verbascosa) que se encuentran en pequeñas cantidades (Vargas-Torres *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2010; Rehman *et al.*, 2001).

Las semillas de frijol crudas o procesadas contienen altas cantidades de almidón resistente (AR) en comparación con los cereales, tubérculos y frutas verdes (Bello-Pérez y Paredes-López, 2009). Este almidón resistente (AR), al no ser digerido por las enzimas digestivas humanas, sigue su tránsito por el intestino delgado y llega al intestino grueso, donde se fermenta por la microflora del colon produciendo ácidos grasos de cadena corta (AGCC) con alta proporción de butirato, ácido que provoca beneficios para la salud por su efectos hipercolesterolémico y protector contra el cáncer rectal, así como como por la reducción en la respuesta glucémica e insulémica (Reynoso-Camacho *et al.*, 2007; Tovar *et al.*, 2005).

El frijol *Phaseolus vulgaris* L. contiene de 14 a 19 % de fibra dietética (Vargas-Torres *et al.*, 2006) la cual contribuye a reducir la concentración de colesterol en la sangre y participa en la regulación del vaciamiento gástrico, facilitando el tránsito de los alimentos en los intestinos. No obstante, su función puede limitarse por factores antinutricionales, los cuales pueden reducir su biodisponibilidad causando efectos adversos para la nutrición no solo humana sino también animal (Rocha-Guzmán *et al.*, 2008; Iniestra-González *et al.*, 2005).

Por otra parte, los oligosacáridos presentes en el frijol como rafínosa, estaquiosa y verbascosa, han sido señalados como importantes prebióticos que regulan favorablemente la flora intestinal del colon (Elizalde *et al.*, 2009). Se ha demostrado que dichos compuestos limitan el crecimiento de bacterias dañinas al cuerpo humano como *Escherichia coli* (Guzmán-Maldonado *et al.*, 2002).

2.5.3 Lípidos

El frijol contiene entre 1 a 3 % de lípidos, los cuales están compuestos de una gran variedad de ácidos grasos saturados, principalmente de ácido palmítico, pero su

aportación más importante son los ácidos grasos esenciales poliinsaturados tales como el ácido oléico, linoléico y linolénico, ya que no pueden ser sintetizados por animales y humanos, y una forma de adquirirlos es por el consumo de dicha leguminosa (Carmona-García, 2005).

2.5.4 Minerales y vitaminas

Las leguminosas son buena fuente de minerales tales como calcio, hierro, cobre, zinc, fósforo (presente como ácido fítico), potasio y magnesio (Linsberger-Martin *et al.*, 2013). El potasio contribuye con el 25 a 30 % del contenido total de minerales en la semilla (Carmona-García, 2005). Se estima que el frijol aporta 40% de hierro a la dieta de personas que basan su alimentación en frijol y maíz. Del total de hierro presente en frijol, solo se asimila el 20%, por lo que su contribución es baja. Este micronutriente se ha relacionado principalmente con la anemia y forma parte de un gran número de enzimas que intervienen en la producción de energía y al buen funcionamiento de la respuesta inmune en el organismo humano (Martínez-Meyer *et al.*, 2013). En cuanto al magnesio, se conoce que ejerce un efecto protector contra la hipertensión y consecuentemente para los problemas cardíacos (Rodríguez y Fernández, 2003).

Por otra parte, las semillas de frijol son ricas en vitaminas y aportan a la dieta cantidades considerables de tiamina, riboflavina, niacina, piridoxina y ácido fólico (Stupski, 2012); se ha reportado que el ácido fólico, tiamina y niacina reducen los niveles de homocisteína sérica, lo que reduce el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares (Mederos, 2006).

2.5.5 Factores antinutricionales

El término antinutriente se utiliza para describir a aquellos compuestos o sustancias que por sí mismas o por sus productos metabólicos, afectan el valor

nutricional de algunos alimentos, debido a que interfieren o inhiben la asimilación de nutrientes presentes en los alimentos (Mohamed *et al.*, 2011).

El frijol crudo contiene factores antinutricionales y sustancias tóxicas que pueden causar trastornos en el organismo humano (Linsberger-Martin *et al.*, 2013). Estas sustancias son generadas por el metabolismo secundario de las plantas como mecanismo de defensa a situaciones estresantes o contra el ataque de mohos, bacterias, insectos y aves (Elizalde *et al.*, 2009).

De acuerdo con Wang *et al.* (2010) los factores antinutricionales pueden clasificarse como:

- a) **Termo-estables:** factores antigénicos, oligosacáridos y aminoácidos no proteicos tóxicos, saponinas, estrógenos, cianógenos, fitatos, siendo los más importantes factores antigénicos, oligosacáridos, saponinas y fitatos.

- b) **Termo-lábiles:** en este grupo se encuentran, los inhibidores de proteasas (tripsina y quimotripsina), lectinas, goitrógenos, taninos y antivitaminas, siendo los de mayor importancia los inhibidores de proteasas y las lectinas.

Desde el punto de vista bioquímico son factores de naturaleza variada y pueden llegar a causar efectos fisiológicos indeseables (Mohamed *et al.*, 2011), como la flatulencia, distensión estomacal, afectaciones pancreáticas, aglutinación de glóbulos rojos, disminución en la asimilación de nutrientes, entre otros (tabla 5).

Los factores antinutricionales se encuentran presentes en mayor proporción en el frijol cuando la semilla está cruda (Elizalde *et al.*, 2009). Granito *et al.* (2004) señala que la leguminosa debe ser procesada antes de su consumo, ya que con ello se pueden reducir la mayor parte de los compuestos antinutricionales. Principalmente con la cocción se destruyen taninos y algunos oligosacáridos como la rafinosa y estaquiosa (Briones-Bermúdez, 2011; Arias-Tapia, 2002). Por su parte, el ácido fítico

es muy estable a tratamientos térmicos sufriendo sólo una hidrólisis parcial (Anton *et al.*, 2008; Reynoso-Camacho *et al.*, 2007). Estructuralmente el ácido fitico contiene fósforo y enlaza minerales nutricionalmente importantes, tales como hierro, zinc y calcio. Los complejos mineral-fitato causan una reducción de la biodisponibilidad de los minerales (Deak y Lawrence, 2007).

Tabla 5. Principales factores antinutricionales presentes en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

Factor antinutricional	Efecto negativo
Inhibidores de tripsina*	Causa baja digestibilidad de las proteínas del frijol.
Taninos*	Disminuyen la digestibilidad de la proteína del frijol y limitan la biodisponibilidad de minerales como el hierro y el zinc.
Ácido fitico***	Afecta la asimilación del zinc.
Hemoaglutininas***	Aglutinación de glóbulos rojos.
Lectinas (pertenece a las hemoaglutininas)***	Según estudios realizados en ratas, inducen el crecimiento del páncreas en las mismas y producen ulceración y necrosis en el intestino.
Oligosacáridos de bajo peso molecular (rafinosa, estaquiosa y verbascosa)**	Problemas de digestibilidad y flatulencias, aumento de la motilidad intestinal, náuseas, contracciones musculares y diarreas.
Saponinas****	Alteración de la mucosa intestinal, no se absorben en el intestino y por lo tanto afectan la absorción del zinc y el hierro.
Deficiencia de los aminoácidos azufrados***	Provoca bajo aprovechamiento de hierro y zinc.

Fuentes: Mohamed *et al.*, 2011*; Iniestra-González *et al.*, 2005**; Guzmán-Maldonado *et al.*, 2002***; Rodiño-Minguez, 2000****.

La aplicación de diversos tratamientos tecnológicos tales como germinación, remojo, cocción, eliminación del pericarpio y fermentación son conocidos por reducir los factores antinutricionales de manera eficaz y mejorar la calidad nutricional de las leguminosas (Mohamed *et al.*, 2011; Nilgün, 2011).

Elizalde *et al.* (2009) reportan que a pesar del papel tóxico atribuido a los factores antinutricionales, pequeñas cantidades pueden ser benéficos para la prevención o tratamiento de ciertas enfermedades, por lo que también se les puede llamar "compuestos no nutritivos" o "factores nutricionalmente bioactivos", ya que si bien carecen de valor nutritivo, no resultan perjudiciales a dosis bajas como es posible encontrarlas en las formas habituales de preparación para su consumo, como ejemplo por medio de cocción (tabla 6).

Tabla 6. Propiedades funcionales de algunos factores antinutricionales.

Factor antinutricional	Efecto positivo
Oligosacáridos de la rafinosa*	Disminuye el colesterol y el índice glicémico, además disminuyen el riesgo de padecer cáncer de colon.
Saponinas*	Acción antimicótica, antiviral, anticancerígeno, hipocolesterolémica, hipoglicémica, antitrombótica, diurética, antiinflamatoria y molusquicida.
Ácido fítico *	Reduce el colesterol sérico y los triglicéridos, suprime oxidación mediada por el hierro y previene algunos tipos de cáncer.
Inhibidores de tripsina**	Confieren protección contra rotavirus, inhiben carcinogénesis y pueden ser utilizados como agentes quimioprotectores.
Taninos	Son agentes antioxidantes, anticancerígenos y antimutagénicos efectivos.

Fuente: Elizalde *et al.*, 2009*, Guzmán-Maldonado *et al.*, 2002**.

2.6 Producción mundial de frijol

2.6.1 Aspectos relevantes del mercado internacional

De acuerdo a estudios de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), a nivel mundial, el frijol es la leguminosa alimenticia más importante para el consumo humano (Secretaría de Economía, 2012; Serrano-Covarrubias, 2005). Este cultivo es producido en sistemas, regiones y ambientes tan diversos como América Latina, África, el Medio Oriente, China, Europa, Estados Unidos, y Canadá. En América Latina, es un alimento tradicional e importante, especialmente en Brasil, México, América Central y el Caribe (Vargas-Torres *et al.*, 2006).

La producción mundial de frijol se ha mantenido a una tasa de crecimiento anual de 2.8%, obteniéndose para el año 2010 una producción mundial de 23.2 millones de toneladas (FAOSTAT), de las cuales siete se producen en América Latina y África (Gepts *et al.*, 2007).

2.6.2 Principales países productores, exportadores e importadores de frijol

De acuerdo con el último reporte de la FAOSTAT, los principales países productores de frijol en el mundo conforme a la producción de frijol del año 2000-2010 son: Brasil (16%), India (15.9%), Myanmar (10.5%), China (8.9%), ocupando el quinto lugar México con 5.8 %, que corresponde a 1 millón de toneladas en promedio anual.

Los principales países exportadores de frijol en el mundo son Myanmar, que generó un volumen de exportación acumulado de 29.3 % durante 2000-2010, seguido de China (24.2%), Estados Unidos (10.4%), Canadá (8.7%), Argentina (7.3%), Reino Unido, Australia, Tailandia, Etiopía y Nicaragua con menos del 2 % cada uno. Por su parte, México mantiene una posición muy lejana de estos países.

con tan solo el 0.5 % de exportaciones mundiales acumuladas, es decir, un promedio de 14,684 toneladas anuales (Secretaría de Economía, 2012). En el caso de Estados Unidos, sus exportaciones han aumentado significativamente en la última década y están muy relacionadas con la demanda de frijol en México (Anton *et al.*, 2008).

En lo que corresponde a los principales países importadores de esta semilla se encuentran: la India con el 15.8 % del volumen acumulado de importaciones de 2000-2010, seguido de Estados Unidos (5.5%), Japón (4.7%), Reino Unido (4.5%), Cuba y Brasil (3.9%). México ocupa el séptimo lugar con el 3.8 % (FAOSTAT). Por desgracia, México ha pasado de ser un país exportador de frijol a uno importador, principalmente por las bajas tasas de productividad en el campo en cultivo de temporal (Velásquez y Giraldo, 2005).

2.7 El frijol en México

2.7.1 Importancia

Esta semilla representa toda una tradición productiva y de consumo, que ha permitido trascender hasta la actualidad. Es un producto estratégico en el desarrollo rural del país y ocupa el segundo lugar en superficie sembrada a nivel nacional (1.6 millones de hectáreas cosechadas) con una producción de 1.1 millones de toneladas, cuyo valor representó 10.2 miles de millones de pesos, es decir, el 3.1 % del valor de la producción agrícola para el año 2010 (INEGI, 2012).

La producción de frijol está orientada a satisfacer la demanda nacional debido a que forma parte importante en la alimentación diaria del pueblo mexicano (Ayala-Garay *et al.*, 2008). La presencia de frijol a lo largo de la historia, sobre todo de México, lo ha convertido no sólo en un alimento tradicional, sino también en un elemento de identificación cultural, comparable con otros productos como maíz y chile, que son básicos en la gastronomía del pasado, presente, y muy probablemente del futuro de México (Adame y Gutiérrez, 2001).

2.7.2 Regiones productoras de frijol en México

La producción de frijol en México creció en 2.7 % en promedio anual durante el periodo de 2000-2011, lo cual representa una producción promedio anual de 1.14 millones de toneladas. La dinámica observada durante el periodo 2000-2011, indica que la producción de frijol ha representado una amplia variación. La principal limitante en su producción, la constituye sin duda la escasa disponibilidad de agua, fenómeno que se agudiza en regiones con bajo régimen de precipitación pluvial como Zacatecas, Durango y Chihuahua (Secretaría de Economía, 2012).

El cultivo de frijol se puede realizar bajo casi todas las condiciones de suelo y clima. Por lo anterior, tiene presencia en las 32 entidades federativas, sin embargo, siete son los estados que producen tres cuartas partes de la producción nacional: Zacatecas (28.2%), Sinaloa (13.6%), Durango (11.5%), Chiapas (6.5%), Chihuahua (6.1), Nayarit (5.8%) y San Luis Potosí (4.2%) (Ayala-Garay *et al.*, 2008).

La región centro-norte donde se encuentran las entidades con mayor producción de frijol con 54.2 % del total nacional son: Zacatecas, Durango, Chihuahua, San Luis Potosí y Guanajuato, quienes resultan beneficiadas por su clima templado-semiárido, sin embargo, pueden verse afectados por la escasez de lluvia y los efectos de sequía que son acentuados por el tipo de suelos predominantes, los que son poco profundos, con bajo contenido de materia orgánica y baja capacidad de retención de humedad. Por su parte, la región noroeste tiene un clima cálido con invierno seco, donde se produce frijol bajo condiciones de riego y humedad residual; en esta región, los principales estados productores son Sinaloa y Nayarit que aportan el 19.4 % de la producción nacional de frijol (Secretaría de Economía, 2012).

2.7.3 Consumo de frijol

El consumo de frijol en el país, se encuentra dividido por zonas. En la zona norte de México, se consumen variedades claras y azufradas, que se cultivan principalmente en Sinaloa y Nayarit, mientras que una gran parte de frijol negro se cultiva en Nayarit y Zacatecas, con una demanda mayormente concentrada en las zonas centro y sur del país. La dinámica observada y actual, tanto en la producción, como en la comercialización y el consumo, así como su importancia estratégica en el desarrollo económico y social del país, resultan de gran interés para analizar la situación de la cadena de producción-comercialización-consumo del frijol (SAGARPA, 2008).

De acuerdo a las preferencias del consumidor por determinada variedad, Carmona-García (2005) realizó una clasificación tomando en cuenta el consumo o preferencia de la sociedad mexicana por determinada variedad (tabla 7). La aceptación comercial de una variedad está determinada por las propiedades físicas, químicas, nutrimentales y funcionales de la semilla, por lo tanto, es elemental conocer cada una de éstas para ofrecer las mejores variedades a los productores y consumidores de frijol (Allende *et al.*, 2006).

Tabla 7. Principales variedades de frijol consumidas en México.

Preferencia del consumidor	Variedad
Muy preferente	Azufrado, Mayocoba, Negro Jamapa, Peruano, Flor de Mayo, Flor de Junio.
Preferente	Garbancillo, Manzano, Negro San Luis, Negro Querétaro y Pinto.
No Preferente	Alubia Blanca, Bayo Blanco, Negro Zacatecas, Ojo de Cabra y Bayo Berrendo.

Fuente: Carmona-García, 2005.

2.7.4 Factores que afectan el consumo de frijol

El consumo de frijol actualmente enfrenta a modificaciones importantes ante una sociedad cambiante, derivado del paso de una economía cerrada a una economía global, lo cual ha ocasionado un aumento en las tendencias de migración y urbanización, los que a su vez también ha ocasionado cambios en los hábitos de alimentación, resultando actualmente deseable el desarrollo de productos altamente convenientes y saludables (Secretaría de Economía, 2012).

En México, las estadísticas muestran que año con año, el consumo de frijol va en descenso, principalmente porque el tiempo disponible para la preparación de alimentos es muy corto (SAGARPA, 2008). Otro factor importante desde el punto de vista de calidad, es la frescura de la semilla, la cual está directamente relacionada con el tiempo de cocción; mientras más fresca es la semilla, menos tiempo tardará su cocción (SAGARPA, 2004).

Además, la participación de la mujer en los trabajos remunerados en nuestra sociedad es cada vez mayor, por lo que dispone de menos tiempo para dedicarlo a la preparación de alimentos. Por lo tanto, la gran mayoría de los consumidores tienen menos tiempo para preparar el alimento diario y de esa manera resulta más fácil preparar una sopa precocida que "poner a cocer el frijol". En el caso específico de frijol, éste es un producto que requiere de mucha inversión de tiempo para su cocción, por lo que la industria de transformación de alimentos busca elaborar productos convenientes y de rápida preparación (Serrano-Covarrubias, 2005).

Con estas referencias, sobresale la necesidad de buscar nuevas formas de consumo del frijol, lo cual aumentaría su producción y consumo, reduciendo con ello, muchos problemas inherentes al cultivo (Bonilla, 2011).

2.8 El frijol en Nayarit

2.8.1 Producción de frijol en Nayarit

El estado de Nayarit es uno de los más privilegiados de la República Mexicana en cuanto a condiciones agroecológicas propicias para una gran variedad de cultivos agrícolas, condiciones que hacen que su actividad económica se base en el sector agrario, donde los cultivos agrícolas considerados como ejes más importantes de la región son: el frijol, tabaco, café, mango, plátano y caña de azúcar (SAGARPA, 2011).

A nivel nacional, Nayarit es el quinto productor de frijol, aportando al sistema alimentario un total de 75 mil 754 toneladas, 7.6 % del total en el país, con un rendimiento promedio de 1.5 toneladas por hectárea, es decir, casi el doble del exhibido nacionalmente para este cultivo (SAGARPA, 2008).

El frijol, representa el 15 % de la producción agrícola en el estado, con un valor de 956 millones de pesos. De acuerdo a los últimos datos de producción, la mayor parte de la cosecha se realizó en el municipio de Santiago Ixcuintla, que por sí solo aportó 41.8 %, seguido de Tuxpan (17.9%), San Blas (12.3%) y Rosamorada (9.4%); de los veinte municipios de esta entidad costera, los cuatro señalados, contribuyeron con más de 80 % de la producción local total (SAGARPA, 2011).

Las variedades de frijol que predominan en el estado son el frijol negro jamapa y el negro Nayarit, sin embargo, también se siembra frijol claro entre los que destacan el azufrado regional, el azufrado amarillo 33, el mayocoba, el azufrado peruano, el bayo berrendo y el canario 72; por orden de importancia se tiene al frijol negro jamapa con cerca de 70 %, azufrado regional con el 21 %, mayocoba con el 8 % y el resto para las demás variedades (SAGARPA, 2005).

Los patrones de consumo están orientados hacia las variedades claras que representan entre el 20 al 25 % de la producción, mientras que el resto de la producción, que son variedades negras, se comercializan en los estados de Jalisco, Distrito Federal y el Estado de México (Secretaría de Economía, 2012).

2.9 Comercialización de frijol

En la comercialización de frijol la mayoría de productores recurren a intermediarios o mayoristas, quienes distribuyen masivamente el producto hacia los consumidores finales. Este excesivo "intermediarismo" en la comercialización de la semilla, no agrega valor y origina mayores costos tanto para los comerciantes en los centros de consumo, como para los productores al recibir un menor precio por sus cosechas (SAGARPA, 2004).

Además, en la estructura del proceso de comercialización de frijol, se observa que existe un vacío de mercado provocado por la desaparición de CONASUPO, ya que actualmente lo realizan acopios particulares y mayoristas de destino. Por otro lado, la industria y los mayoristas buscan semillas más baratas y de calidad, siguiendo la lógica de apropiarse del mayor valor agregado, como consecuencia de esto, han surgido organizaciones de productores que empiezan a comprender que para competir en este entorno, se requieren de nuevas estrategias y técnicas que permitan participar en la cadena de frijol (Schwentenius-Rindermann *et al.*, 2011).

En muchos países, se ha intentado adaptar una gama de productos alimenticios procesados de frijol, debido a que los consumidores tienden a abandonar el consumo de alimentos tradicionales para mantener un estilo de vida moderno (Guzmán-Maldonado *et al.*, 2002).

La industrialización del frijol y la tendencia por el consumo de alimentos con gran aporte nutritivo o funcional, puede constituir una manera indirecta de incrementar su cultivo, a través de un incentivo económico más estable; además, el

producto procesado tendría las ventajas de ofrecer mayor estabilidad, disponibilidad constante a través de todo el año, mayor uniformidad, rápida preparación, y podría ser un vehículo para otros nutrientes (Mendoza-Rodriguez, 2003).

2.10 Deshidratación de alimentos

2.10.1 Deshidratación

La deshidratación a través de la historia, es una de las técnicas con mayor aplicación para la conservación de alimentos. El primer objetivo de la operación de deshidratación en cuanto al aumento de la estabilidad del producto, se define en términos de disminución de la actividad de agua (a_w) y no en término de disminución del contenido en humedad, puesto que la a_w puede ser considerada como una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en ciertas reacciones bioquímicas, enzimáticas, microbianas, o bien interactuando con solutos presentes en el alimento, como son: proteínas, carbohidratos, lípidos y vitaminas (Vega-Gálvez *et al.*, 2009; Pardeshi *et al.*, 2009; Mendoza-Rodriguez, 2003). De acuerdo con Arias-Tapia (2002), el agua pura, tiene una a_w de 1.00 y la mayoría de los alimentos se alteran por encima de 0.8 (tabla 8).

La deshidratación de alimentos es sin duda uno de los métodos más utilizados actualmente en la industria procesadora de alimentos. La gran demanda y aceptación que tienen los productos deshidratados puede atribuirse a que ha crecido la preocupación de las personas por cuidar su salud y alimentarse sanamente, pero que disponen de poco tiempo para preparar sus alimentos. Además, la enorme ventaja es que los productos deshidratados mantienen gran parte de sus propiedades físicas y químicas como: sabor, color, olor, consistencia, textura y aspecto durante mucho tiempo (Marín *et al.*, 2006).

Hoy en día los alimentos deshidratados constituyen un sector muy importante dentro de la industria alimentaria que se ha extendido por todo el mundo. El tamaño de las instalaciones varía desde simples secadores solares hasta grandes y

sofisticadas instalaciones de secado. Actualmente se encuentran disponibles en supermercados y tiendas de preferencia una amplia variedad de productos deshidratados o formulados a partir de ingredientes deshidratados (Maupoey *et al.*, 2001).

Tabla 8. Actividad de agua (a_w) a la cual crecen algunos microorganismos en alimentos.

Grupo	a_w
Agua pura (referencia)	1.00
Bacterias G -	0.97
Bacterias G +	0.90
Levaduras	0.88
Hongos filamentosos	0.80
Bacterias halófilas	0.75
Hongos xerófilos	0.60

G (-) = Gram negativas; G (+) = Gram positivas. Fuente: Jangam *et al.*, 2010.

2.10.2 Ventajas y desventajas

Además de la conservación de las propiedades del alimento, al reducir el contenido de agua existen otras ventajas en los alimentos deshidratados: Colina-Irezabal (2010) menciona las siguientes: vida útil muy prolongada (12 a 24 meses) sin la necesidad de aditivos, almacenamiento a temperatura ambiente, reducción del peso y volumen del producto (lo que facilita y reduce costos de empaque, almacenamiento y transporte), preparación rápida del producto (leche en polvo, café soluble, sopas instantáneas), obtención de productos con propiedades funcionales, compatibilidad con otros alimentos en mezclas secas, rehidratación a la concentración deseada, menor producción de residuos, disponibilidad constante a lo largo del año y a precios estables. Sin embargo, los alimentos deshidratados también pueden presentar ciertas desventajas, como son: en algunos casos, dificultad para una completa rehidratación (depende del método y condiciones de la deshidratación), modificación de la textura en alimentos sólidos, modificación de sabor, olor y color; en

algunos productos. Algunos métodos de deshidratación (como liofilización) tienen un costo relativamente alto.

No obstante, para obtener alimentos deshidratados de buena calidad es imprescindible estudiar en detalle los fenómenos de transferencia de materia y energía involucrados en el proceso, así como los cambios producidos a nivel estructural (porosidad, firmeza, encogimiento, densidad) y las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo durante el proceso, obteniendo productos con mayor uniformidad y facilidad de preparación (Rocha *et al.*, 2012; Marín, *et al.*, 2006; Akpınar y Bicer, 2005).

2.10.3 Métodos de deshidratación

La remoción del agua necesaria para la obtención de un producto con una actividad de agua (a_w) suficientemente baja para garantizar su conservación, puede efectuarse mediante dos mecanismos, por evaporación o sublimación, los cuales a su vez, se pueden dividir en tres procesos diferentes denominados: secado, deshidratación y liofilización (tabla 9).

Una clasificación de los métodos de remoción de agua, con base en el modo en que se transfiere el calor, así como algunos de los equipos más comunes y algunos ejemplos de los alimentos que por lo general se utilizan en ellos se presentan en la tabla 10. Tal clasificación es quizá una de las más descriptivas en relación con el mecanismo de remoción de agua y la metodología para el cálculo de las operaciones de proceso.

Aunque existen distintos métodos de deshidratación o remoción de agua en alimentos, la aplicación de determinado método dependerá de las características del alimento y de las características que requiera obtener el producto final (Jangam *et al.*, 2010).

Tabla 9. Procesos para remover el agua de un alimento.

Mecanismo	Proceso	Característica
Evaporación	Secado	Reducción del contenido de agua de los alimentos mediante evaporación de la misma, utilizando las condiciones ambientales naturales. Ejemplo: secado solar.
	Deshidratación	Reducción del contenido de agua de los alimentos mediante evaporación de la misma por acción del calor artificial. Ejemplo: aire caliente, superficie caliente, microondas.
Sublimación	Liofilización	Reducción del contenido de agua de los alimentos mediante sublimación del hielo del producto congelado mediante aplicación de vacío.

Fuente: Colina-Irezabal, 2010.

Tabla 10. Métodos de deshidratación más utilizados en alimentos.

Método	Equipos de deshidratación	Tipo de producto a deshidratar
En cama o banda	Deshidratador de bandejas o charolas	Sólidos (piezas, trozos), fluidos con sólidos de tamaño grande en suspensión y, en menor proporción, fluidos viscosos
	Deshidratador de banda Deshidratador de túnel	
Por aire (convección)	Deshidratado por aspersión	Fluidos con pequeños sólidos en suspensión
	De partículas Deshidratado por espuma Deshidratador de lecho fluidizado	Fluidos con pocos sólidos en suspensión Sólidos de pequeño tamaño Fluidos muy viscosos (pastas)
Por conducción	Deshidratador de tambor	
Por radiación	Deshidratador por infrarrojo	Cualquier tipo de alimento
	Deshidratador dieléctrico	
	Deshidratador por microondas	
Por congelación	Liofilizador	Sólidos de tamaño pequeño y suspensiones

Fuente: Colina-Irezabal, 2010.

2.10.4 Deshidratador de bandejas

La deshidratación por aire en charolas, también denominada deshidratación por convección o deshidratación adiabática, es aquella en donde el alimento por deshidratar se pone en íntimo contacto con una corriente de aire caliente no saturado, el cual calienta el alimento hasta la temperatura de vaporización del agua y la remueve de la superficie del alimento. Es una operación básica por la que el agua que contiene un alimento, se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los

gradientes de actividad de agua entre ambas fases. Este método se utiliza principalmente para la deshidratación de alimentos sólidos, ya sean enteros, en trozos, rebanadas, segmentos, así como para algunos alimentos granulares o fluidos que contienen sólidos de tamaño considerable (Jangam *et al.*, 2010).

El deshidratador está constituido por una cámara donde se colocan las bandejas con el alimento a deshidratar. El aire de secado es calentado y forzado a pasar sobre el conjunto de bandejas y a través del alimento. Los calentadores de aire pueden ser quemadores de gas directo, serpentines de vapor, intercambiadores o resistencias eléctricas (figura 2). En el caso de deshidratadores industriales, las bandejas son colocadas sobre vagonetas que facilitan su manejo (Arias-Tapia, 2002).

Colina-Irezabal (2010) reporta que la dirección del flujo de aire, con respecto a la posición o movimiento del producto en el deshidratador, es una de las características de diseño más importantes en este equipo, en donde la dirección del flujo de aire puede ser paralelo (ya sea concurrente o a contracorriente) o en sentido transversal (hacia arriba o hacia abajo) (figura 2).

2.10.5 Factores que influyen en la velocidad de deshidratación

Las variables de operación de un deshidratador, son los principales factores que influyen en la velocidad de deshidratación de un alimento, siendo los más importantes los siguientes: temperatura del aire de entrada ($^{\circ}\text{C}$), velocidad del aire ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), humedad relativa del aire (%), densidad de carga del material ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) y humedad, tamaño, forma y estructura del alimento (Marín *et al.*, 2006)

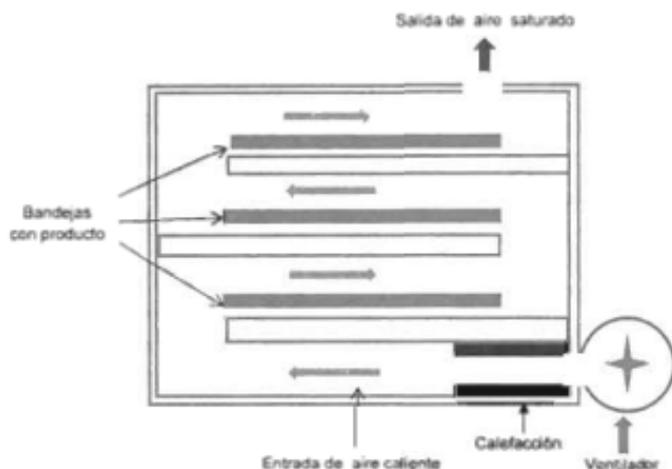


Figura 2. Deshidratador de bandejas con circulación y flujo de aire paralelo al producto.

En el caso de alimentos deshidratados, las variables de operación del deshidratador, así como los pretratamientos o acondicionamiento previo al deshidratado, tienen fuerte influencia sobre la velocidad de secado y afectan significativamente las propiedades físicas y químicas del producto terminado, o su respuesta a procesos posteriores como la rehidratación (Gowen *et al.*, 2006a). Por lo que es de importancia controlar dichos parámetros para obtener alimentos con las características y la calidad final deseada.

2.10.6 Parámetros cinéticos en deshidratación

La amplia variedad de alimentos deshidratados a disposición para el consumo (aperitivos, sopas, frutas, botanas, entre otros) y la importancia de la calidad, así como las especificaciones y la conservación de energía, hacen hincapié en la necesidad de una comprensión completa del proceso de secado de alimentos (Rocha

et al., 2012; Pardeshi *et al.*, 2009; Montes *et al.*, 2008; Akpınar y Bicer, 2005). Para diseñar, controlar y definir condiciones de secado óptimas, es necesario modelar el proceso real de secado en términos de relaciones o modelos matemáticos. Algunos estudios en torno al secado de frutos y vegetales, han determinado que es un proceso difícil de describir, debido a la complejidad de los fenómenos internos y externos que ocurren durante el proceso (Sandoval *et al.*, 2006). No obstante, en la literatura se encuentran distintos métodos propuestos para analizar el secado de productos alimenticios tales como: modelos teóricos, semiteóricos y empíricos (Kavak y Bicer, 2005; Panchariya *et al.*, 2002).

Los modelos de secado basados en la teoría de difusión de líquidos han sido preferidos por los investigadores en el área de secado de alimentos, dentro de los que destacan los modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Midilli *et al.*, Lewis, Thompson, Wang y Singh, exponencial simple de dos y tres parámetros, exponencial duplo dos, tres y cuatro parámetros y exponencial triplo de seis parámetros (Akpınar y Bicer, 2005; Midilli *et al.*, 2002; Karatanos, 1999; Kassem, 1998; Sharaf-Elden *et al.*, 1980; Wang y Singh, 1978; Henderson, 1974; Overhults *et al.*, 1973; Thompson *et al.*, 1968; Henderson y Pabis, 1961 (citado por Pardeshi *et al.*, 2009); Lewis, 1921 y Page, 1949 (citado por Rocha *et al.*, 2012)).

Tales modelos permiten establecer el contenido final de humedad de los productos agrícolas y los requisitos del proceso de secado. Además, ofrecen herramientas para establecer las condiciones de almacenamiento y empaque (Vega y Fito, 2005). Cabe mencionar que gran cantidad de modelos teóricos y empíricos, se han aplicado para diversos procesos de alimentos deshidratados y productos agrícolas como tomillo (Rocha *et al.*, 2012), Arroz (Ondier *et al.*, 2010), chicharos (Pardeshi *et al.*, 2009), frijol lima (Pereira *et al.*, 2009), ñame (Montes *et al.*, 2008), frijol soja (Gowen *et al.*, 2007a), papaya (Vega y Lemus, 2010), berenjena (Akpınar y Bicer, 2005), pistaches (Midilli y Kucuk, 2003), té negro (Panchariya *et al.*, 2002), uvas (Yaldiz y Ertekin, 2001), cebada (Afzal y Abe, 2000) y avejlanas (Özdemir y Devres, 1999).

2.10.7 Frijol deshidratado

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye un alimento básico de la dieta de los mexicanos y se ha utilizado en la preparación de comida y platillos tradicionales por muchos años. Dicho alimento es una fuente importante de proteínas, carbohidratos complejos, fibra y minerales, así como de fitoquímicos biológicamente activos benéficos para la salud (Gallegos-Infante *et al.*, 2010). El principal problema en la utilización de frijol es la necesidad de tiempos prolongados de preparación y cocción (Ulloa *et al.*, 2011; Piergiovanni, 2011; Vasconcelos-García *et al.*, 2012; Rocha-Gúzman *et al.*, 2008). Por lo tanto, la disposición de frijol entero instantáneo podría ser una alternativa para la rápida preparación y consumo de este valioso alimento. Por ello, actualmente se promueve el desarrollo de productos alimenticios a base de frijol, como una oportunidad de mercado en la industria de alimentos, especialmente de aquellos de alto valor agregado como el frijol precocido deshidratado. Sin embargo, en la producción de frijol entero precocido deshidratado, el principal problema a resolver es la pérdida de calidad o de la integridad de la semilla, expresada por la apertura de cotiledones (AC) y/o separación de cotiledones (SC), causando comúnmente la pérdida de la estructura de la semilla (figura 3), sabor, textura e identidad del producto, lo cual se provoca por la alta temperatura y alta velocidad de deshidratación (tabla 11) (Cai y Chang, 1997).

Tabla 11. Principales indicadores de la pérdida de calidad del frijol durante deshidratación.

Indicador	Abreviatura	Características
Abertura de cotiledones	AC	Fisuras transversales en el pericarpio de la semilla mayores a 2 milímetros (mm)
Separación de cotiledones	SC	Separación de dos cotiledones por más de la mitad de la longitud de la semilla

Fuente: Su y Chang, 1995.

No obstante, pocos estudios han sido enfocados a determinar el efecto de secado utilizando temperaturas y velocidad de aire bajas (Ondier *et al.*, 2010), en la calidad de frijol precocido deshidratado (Ulloa *et al.*, 2013; Pan *et al.*, 2010; Cai y Chang, 1996; Su y Chang, 1995).

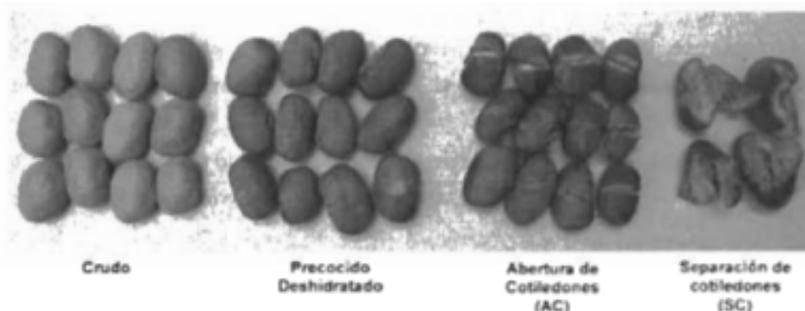


Figura 3. Principales indicadores de la pérdida de calidad de frijol precocido durante el procedimiento de deshidratación.

2.10.8 Rehidratación de alimentos

La rehidratación de alimentos, es la absorción de agua por parte de los alimentos deshidratados, ya sean enteros, en trozos o pulverizados, para poder ser preparados y consumidos. La rehidratación, no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de distintos factores (Krokida y Marinou-Kouris, 2003).

Al rehidatar un alimento, se pretende obtener productos que al reconstituirse, adquieran sus características iniciales y que lo hagan en el menor tiempo. Sin embargo, este proceso se ve influenciado por las operaciones previas a la deshidratación como pretratamientos (escaldado, hidratación, cocción), así como por

las condiciones de deshidratación (temperatura y velocidad del aire), las cuales pueden provocar cambios que son irreversibles en el alimento como: pérdida de textura, ruptura estructural, pérdida de la composición nutricional, entre otros. Por lo tanto, la rehidratación puede considerarse un indicador de calidad, que mide el daño que ha ocurrido en el alimento durante el proceso de deshidratación (Melquiades *et al.*, 2009).

Dentro de los medios de rehidratación más utilizados en alimentos se encuentran, la inmersión en agua como la más utilizada, soluciones azucaradas (glucosa, sacarosa) o inmersión en leche, entre otras, donde los periodos de inmersión deben ser breves; estos medios, deben ayudar a conseguir un producto de características similares al producto fresco (Marin *et al.*, 2006).

En cuanto a la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación, se puede mencionar que el agua (o solución hidratante) es absorbida de forma rápida al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o solución hidratante. El cambio de volumen del producto deshidratado, es proporcional a la cantidad de agua absorbida, aumentando o recuperando su tamaño y volumen inicial (Krokida y Marinos-Kouris, 2003). Melquiades *et al.* (2009) afirman que la rehidratación de materiales deshidratados está compuesta de tres procesos simultáneos: la absorción de agua dentro del material deshidratado, la lixiviación de sólidos solubles y el hinchamiento del material.

Las variables operacionales de deshidratación (temperatura, velocidad de aire, humedad relativa y tiempo) afectan significativamente la calidad final del producto rehidratado, por lo que es común utilizar índices numéricos para observar este efecto, dentro de los cuales destacan: la capacidad de rehidratación (CR), capacidad de retención de agua (CRA) así como la humedad relativa del rehidratado (HRR) (Gowen *et al.*, 2006a). Estos indicadores tienen que ver con la estructura, el tejido y la capacidad de mantener el agua absorbida por el alimento, por lo que estos índices

pueden disminuir o aumentar, ya sea por una desnaturalización y/o agregación de proteínas bajo el efecto de calor, concentración de sales, desorción de agua, destrucción de pectinas o membranas celulares (Marin *et al.*, 2006).

2.10.9 Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación

Dentro de los factores que influyen en los mecanismos de transferencia de materia ocurridos durante el fenómeno de rehidratación de alimentos, Pan y Tangratanavalee (2003) y Marin *et al.* (2006) mencionan los siguientes:

a) Factores extrínsecos:

- I. **Pre-tratamiento al secado:** el escaldado, hidratación y cocción en el alimento, previo a la deshidratación, tienen la finalidad de generar mayor cantidad de espacios intercelulares y permitir una rápida rehidratación y preparación del alimento.
- II. **Método de secado:** se debe considerar el tipo de secado que menor daño provoque a la estructura del producto y sobre sus propiedades nutricionales y sensoriales.
- III. **Temperatura y velocidad de secado:** altas temperaturas de secado implican un menor tiempo de rehidratación, pero los índices de calidad del producto final presentan cambios muy variables con respecto al producto fresco; el aumento de la velocidad de secado provoca un menor tiempo de secado, pero también presenta la misma tendencia que la temperatura de secado al producir mayor daño celular.
- IV. **Temperatura de almacenamiento:** al aumentar la temperatura de almacenaje, aumentan los daños en la pérdida de la calidad del producto.

b) Factores intrínsecos:

- I. **Líquido de rehidratación:** la velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua y menor por ejemplo en soluciones azucaradas, leche o yogurt, debido a la elevada viscosidad que presentan estas últimas, sin embargo, ellas mismas pueden transportar sólidos de importancia nutritiva al producto como vitaminas, proteínas, minerales, entre otros.

- II. **La temperatura de la solución de rehidratación:** un alimento deshidratado a una temperatura constante y luego rehidratado a diferentes temperaturas en un medio rehidratante, aumenta su contenido de humedad de equilibrio, el aumento de temperatura del medio de rehidratación incrementa la velocidad del proceso, debido principalmente al aumento de la difusividad de agua y de solutos, permitiendo así, una reducción sustancial del tiempo de rehidratación.

- III. **Agitación durante la rehidratación:** la generación de turbulencia en el medio de rehidratación, logra una mayor homogenización y facilita el intercambio de materia (agua y solutos), siempre tomando en cuenta la velocidad de agitación.

- IV. **Características del producto:** las propiedades físico-químicas, mecánicas (microestructurales), sensoriales y nutricionales del producto, determinan el comportamiento de los alimentos en el proceso de rehidratación.

2.10.10 Parámetros cinéticos en rehidratación

Diversos estudios han sido enfocados al estudio de la difusión del agua dentro de los alimentos, debido a que este proceso está influenciado por factores intrínsecos y extrínsecos (Pan y Tangratanavalee, 2003). Entre los modelos más utilizados se incluyen: el modelo difusional el cual utiliza la segunda ley de Fick, el modelo exponencial (Misra y Brooker, 1980), el modelo de Peleg (Peleg, 1988), cinética de primer orden (Krokida y Marinou-Kouris, 2003), modelo de Becker (Becker, 1960), la función de distribución de Weibull (Sacchetti *et al.*, 2003) y la función de distribución de Weibull normalizado (Marabi y Saguy, 2004). De estos, el modelo de Peleg (1988) y la cinética de primer orden se destacan como los más utilizados en los procesos de rehidratación de semillas de leguminosas (Kaptso *et al.*, 2008; Sopade *et al.*, 2007; Gowen *et al.*, 2007a, b; Abu-Ghannam y McKenna, 1997b), por presentar parámetros de importancia para la optimización de los procesos de calidad, los cuales además de simular correctamente el proceso, describen los posibles mecanismos y variables existentes durante el mismo (Corzo *et al.*, 2008).

Actualmente, existe escasa información en el plano físico sobre las características del modelado y la rehidratación de semillas de frijol de la variedad azufrado.

2.10.11 Ecuación de Arrhenius

La velocidad de casi todas las reacciones químicas aumenta, en general, con la temperatura. Arrhenius observó que en casi todas las reacciones, el aumento de la velocidad de reacción con la temperatura no es lineal. Además, descubrió que en mayor parte, los datos de reacción obedecían a una ecuación basada en tres factores: la fracción de moléculas con energía igual a la energía de activación (E_a) o mayor, el número de colisiones que ocurren por segundo y la fracción de las colisiones con la orientación apropiada (Brown *et al.*, 2004).

Estos tres factores se encuentran incorporados en la ecuación de Arrhenius (Abu-Ghannam y Mckenna, 1997a):

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \quad \text{Ecuación 1}$$

Cuya ecuación de forma reorganizada se expresa como:

$$\ln k = \ln k_0 - E_a/RT \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

E_a es la energía de activación, R es la constante universal de los gases ($8.31434 \times 10^{-3} \text{ KJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T es la temperatura absoluta ($^{\circ}\text{Kelvin}$), k es la constante de hidratación (min^{-1}) y k_0 es una constante con las mismas unidades de k , que no cambia al variar la temperatura. Dicha constante está relacionada con la frecuencia de colisión entre moléculas y con la probabilidad de que las colisiones tengan una orientación favorable para reaccionar.

Además, existe una relación directa entre la E_a y k , conforme la magnitud de E_a aumenta k disminuye, debido a que la fracción de moléculas con la energía mínima necesaria de colisión es menor (Rocha *et al.*, 2012).

III. JUSTIFICACIÓN

El frijol es un alimento importante desde el punto de vista económico y nutricional que se consume en todas las regiones del mundo, es un alimento bajo en grasas y una fuente importante de proteínas, carbohidratos complejos, fibra y minerales, así como de fitoquímicos biológicamente activos benéficos para la salud. El consumo regular de frijol está relacionado con la reducción de riesgos de enfermedades del corazón, obesidad, alteraciones en el tracto gastrointestinal y cáncer.

Por ello, actualmente se promueve el desarrollo de productos alimenticios a base de frijol, especialmente de aquellos de alto valor agregado como el frijol precocido deshidratado. De tal manera, la industrialización de frijol podría constituir una oportunidad de mercado en la industria de alimentos. Sin embargo, el principal problema a resolver en la producción de frijol precocido deshidratado es la alta tasa de defectos estructurales (AC y SC), provocada por la alta velocidad de deshidratación. Aunque se afirma de manera general que la deshidratación a baja temperatura y baja velocidad del aire puede reducir la tasa de AC y SC, es necesario establecer las condiciones de deshidratación adecuadas para obtener frijol precocido deshidratado de aceptable calidad.

IV. HIPÓTESIS

El proceso de secado a baja temperatura y baja velocidad del aire disminuye el daño estructural (AC y SC) en frijol precocido deshidratado y, permite a su vez, obtener altas tasas de absorción de humedad en el alimento rehidratado

V. OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar las cinéticas de deshidratación y rehidratación de frijol azufrado entero instantáneo a diferentes condiciones de temperatura y velocidad del aire.

5.2 Particulares

Determinar el porcentaje de abertura de cotiledones (AC) y separación de cotiledones (SC) después del proceso de deshidratación.

Evaluar las propiedades físicas, largo, ancho, espesor, esfericidad, diámetro geométrico, área superficial, volumen, peso promedio de 100 semillas y color de semillas de frijol antes y después del proceso de deshidratación.

Caracterizar las propiedades bromatológicas (contenido de humedad, proteína cruda, cenizas, grasa cruda) así como la actividad de agua de frijol antes y después del proceso de deshidratación.

Determinar el grado de cocción de frijol precocido deshidratado por calorimetría diferencial de barrido.

Determinar la capacidad de rehidratación (CR), capacidad de retención de agua (CRA) y la humedad relativa del rehidratado (HRR) en el proceso de rehidratación.

Seleccionar los modelos matemáticos que mejor describan el comportamiento cinético de deshidratación y rehidratación del frijol entero instantáneo, considerando los valores de coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE), chi-cuadrada (χ^2), eficiencia del modelo (EF) y error promedio porcentual (P_0 , %).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Material vegetal

Las semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de la variedad azufrado, fueron recolectadas de un acopio del municipio de Santiago Ixcuintla, Nayarit, México (Cosecha invierno 2011-2012). Posteriormente, a dichas semillas se les retiró las impurezas propias de la cosecha y se almacenaron a temperatura ambiente (22°C) en bolsas de plástico para su análisis. Previo al procesamiento del frijol, se realizó una selección eliminando aquellas semillas rotas, quebradas o dañadas. Con las semillas seleccionadas se formaron lotes de 400 g, los cuales se lavaron con agua corriente hasta eliminar el polvo superficial y enseguida se escaldaron en 1200 mL de agua purificada 96 °C por 3 minutos (Jadhav *et al.*, 2010). Después del escaldado, las semillas se sometieron a hidratación en 2800 mL de agua a 45 °C por 120 min (Ulloa *et al.*, 2013) y a continuación se realizó la cocción a 95 °C por 120 min (Dolan *et al.*, 2005).

6.2 Deshidratación

Las semillas de frijol precocidas obtenidas del pretratamiento (escaldado, hidratación, cocción), se deshidrataron en un horno de secado por convección modificado (Precision Scientific Group Mod. 27, Chicago, USA) a temperaturas de 25 y 30 °C, bajo una velocidad del aire de 0.5 y 1.0 m s⁻¹ y humedad relativa de 46 ± 6% (tabla 13). En este horno de secado, el aire fluye de forma paralela al producto. La velocidad del aire que pasa a través del sistema se midió con un termo-anemómetro CEM DT-618 (Shenshen Everbest Industria maquinaria, Co., Ltd, Nanshan, Shenzhen, China). Para la deshidratación, las semillas de frijol precocidas se extendieron uniformemente en una sola capa sobre una bandeja rectangular formada por un marco de aluminio (tamaño de 40 x 30 cm) y una malla de plástico, donde la distancia entre los hilos fue de 1.3 mm. Las semillas de frijol se retiraron del horno de secado en intervalos de tiempo de 60 min durante el proceso de deshidratación,

registrando su peso con un balanza digital con precisión de 0.1 g (Acculab sartorius group). La deshidratación de las semillas de frijol precocidas continuó hasta que la disminución en peso no mostró diferencia significativa (11.7 ± 0.7 g agua/100g de sólidos secos [s.s.]) cuyo valor se consideró el contenido de humedad de equilibrio. El contenido de humedad durante las diferentes condiciones de secado, se calculó con la siguiente ecuación:

$$RX = (W_t - W_e) / (W_0 - W_e) \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde RX es la razón del contenido de humedad (adimensional); W_t es el contenido de humedad del producto en un tiempo dado (g agua/100g s.s.); W_0 es el contenido de humedad inicial del producto (g agua/100g s.s.); y W_e es el contenido de humedad de equilibrio (g agua/100g s.s.).

Para el ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos (tabla 12), se realizó un análisis de regresión no lineal por el método Simplex-Quasi-Newton, utilizando el programa Statistica 9.0[®]. Los valores de los parámetros cinéticos de los modelos fueron estimados en función de la temperatura y velocidad del aire de deshidratación.

La bondad de ajuste de los datos experimentales a cada modelo matemático se evaluó en función del coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE), chi-cuadrada (χ^2), eficiencia del modelo (EF) y del error promedio porcentual (P_0 , %). Valores cercanos a 1 para R^2 y EF, en comparación con valores bajos de RMSE, χ^2 , y P_0 , indican una mejor bondad de ajuste. Estos parámetros fueron calculados con las ecuaciones 4, 5, 6 y 7, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{prei} - MR_{expi})^2}{N}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{expi} - MR_{prei})^2}{N - n} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{expi} - MR_{expi_{mean}})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{prei} - MR_{expi})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{expi} - MR_{expi_{mean}})^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$P_0(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(MR_{expi} - MR_{prei})}{MR_{expi}} \right| \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde MR_{expi} es el contenido de humedad experimental (adimensional); MR_{prei} es el contenido de humedad calculado por el modelo (adimensional); N es el número de datos experimentales y n es el número de constantes del modelo.

Tabla 12. Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de deshidratación

Modelo N°	Modelo matemático	Expresión matemática	Referencias
1	Exponencial simple	2 $RX = a \exp(-k t)$	Henderson y Pabis (1951)
2	Exponencial simple	3 $RX = a \exp(-k t) + b$	Akpınar y Boer (2005)
3	Exponencial duplo	2 $RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k a t)$	Kassem (1998)
4	Exponencial duplo	3 $RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k b t)$	Sharaf-Elden et al. (1980)
5	Exponencial duplo	4 $RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson (1974)
6	Exponencial duplo	6 $RX = a \exp(-k t) + b \exp(-g t) + c \exp(-h t)$	Karathanos (1999)
7	Lewis	$RX = \exp(-k t)$	Lewis (1921)
8	Page	$RX = \exp(-k t^n)$	Page (1949)
9	Page modificado	$RX = \exp(-k t)^n$	Overhults et al. (1973)
10	Midilli et al. (2002)	$RX = a \exp(-k t^n) + bt$	Midilli et al. (2002)
11	Thomson	$RX = \exp(-a - (a^2 + 4 b t)^{1/2}) / 2 b$	Thompson et al. (1968)
12	Verma	$RX = \exp(-Kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Pardeshi et al. (2009)
13	Wang & Singh	$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang y Singh (1978)

RX: razón de humedad t tiempo de secado K, K_0 , k, constantes de secado a, b, c, n, g, h coeficientes de ajuste.

6.3 Composición proximal y análisis fisicoquímicos de semillas de frijol

La proteína cruda (955.04), grasa cruda (920.39), cenizas (923.03) y humedad (925.10) fueron determinadas por triplicado de acuerdo a la metodología del AOAC (1990). La actividad de agua (a_w) se determinó por triplicado a 25°C utilizando un equipo Decagon AquaLab CX-2 (Pullman, Washington, USA). Para ello, las muestras pulverizadas (3g) de semillas de frijol crudo y deshidratado, que se obtuvieron por molienda a mano con mortero y un pistilo, se colocaron en las charolas de plástico especiales dentro del equipo para la medición. Previo a la medición, se encendió el equipo y se dejó así por 30 minutos, calibrándolo a continuación con una solución saturada de cloruro de sodio para confirmar su buen funcionamiento. La precisión de las mediciones de actividad de agua fue de ± 0.003 .

6.4 Determinación de las características físicas de las semillas

Las características físicas de las semillas se evaluaron de acuerdo a Kapsto *et al*, (2008) con algunas modificaciones. A 50 semillas, se les midió individualmente la longitud (L), ancho (A) y espesor (E); dichos parámetros se midieron a partir de las tres principales dimensiones que se encuentran perpendiculares entre sí en la semilla. L se define como la distancia del hilio de la semilla hasta el extremo opuesto, mientras que A y E se toman en dos direcciones perpendiculares opuestas del hilio de la semilla, representando el mayor y el menor diámetro respectivamente. El promedio de la medición se tomó como representativo de la variedad. Usando las lecturas anteriores, se calcularon los valores de esfericidad (ϕ), diámetro medio geométrico (D_g , cm), área superficial (S , cm^2) y volumen (V_g , cm^3), mediante las siguientes ecuaciones:

$$\phi = (L \cdot A \cdot E)^{1/3} / L \quad \text{Ecuación 8}$$

$$D_g = (L \cdot A \cdot E)^{1/3} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$S = (\pi \cdot D_g^2)$$

Ecuación 10

$$Vg = (\pi \cdot A \cdot E \cdot L^2) / 6[2L - (A \cdot E)^{0.5}]$$

Ecuación 11

El peso promedio de la semilla se obtuvo pesando 100 semillas de frijol, tomando 500 g como representativo de la variedad (Kapsto *et al.*, 2008). El color fue determinado con un colorímetro Minolta CR-300 (Minolta, Tokyo, Japón). Los valores medidos se expresaron de acuerdo a la escala de color CIELAB L^* (luminosidad), a^* (rojo-verde) y b^* (amarillo-azul). Los valores de L^* , a^* y b^* del blanco estándar usado como referencia fueron 97.14, 0.19 y 1.84 respectivamente. Las semillas de frijol con abertura de cotiledones (AC) y separación de cotiledones (SC) de cada experimento después del proceso de deshidratación se contaron. Los resultados del conteo de semillas con abertura de cotiledones (fisuras transversales en el pericarpio de la semilla mayores a dos milímetros) se reportó como porcentaje de semillas con AC. Los resultados del conteo de separación de cotiledones se reportó como porcentaje de semillas con SC (Pan *et al.*, 2010; Su y Chang, 1995).

6.5 Determinación del grado de cocción

El grado de cocción (GC) de las semillas de frijol después del pretratamiento, se determinó a partir de la evaluación de los procesos térmicos relacionados con la cocción (gelatinización y desnaturalización) empleando un calorímetro diferencial de barrido (DSC, TA instruments modelo Q2000). Aproximadamente 5 mg de la muestra (harina de semillas de frijol crudo y precocido) se colocaron en el interior de una charola de aluminio hermética Tzero (TAinstruments) a la cual se agregó 0.15 µL de agua destilada. Las charolas se sellaron y estabilizaron por 15 min. Se utilizó una rampa de calentamiento de 0°C hasta 110°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Como referencia se empleó una charola hermética Tzero vacía. El grado de cocción se determinó con la siguiente ecuación:

$$GC (\%) = \Delta H_t / \Delta H_0 \cdot 100$$

Ecuación 12

Donde (ΔH_t) es la entalpía de transición del frijol al tiempo t y (ΔH_0) es la entalpía de transición del frijol al tiempo inicial. El análisis de GC se realizó por duplicado.

6.6 Rehidratación

Las semillas de frijol precocido deshidratado empleadas para las pruebas de rehidratación, se seleccionaron descartando aquellas con apertura de cotiledones (AC) y separación de cotiledones (SC). La absorción de agua se determinó de acuerdo al método descrito por Gowen *et al.* (2006a); una muestra de 5 g de frijol precocido deshidratado, se colocó dentro de un vaso de precipitado conteniendo 1000 mL de agua purificada, la cual fue previamente calentada a la temperatura requerida de remojo (60, 70 y 80°C \pm 1°C) en una placa de calentamiento con control de temperatura. Antes de la rehidratación, la muestra deshidratada (W_d) se equilibró a la temperatura respectiva de remojo. La absorción de agua en la muestra rehidratada (W_t) se registró utilizando una balanza digital (Ohaus Corporation, USA) realizando lecturas a intervalos de 3 min., hasta que las lecturas consecutivas entre mediciones fue de 0.05 ± 0.01 g, la cual se consideró como el contenido de humedad de saturación (Tizazu y Emire, 2010). Las propiedades de rehidratación de las semillas precocidas deshidratadas se obtuvieron de acuerdo a la metodología empleada por Gowen *et al.*, (2006a). La capacidad de rehidratación (CR) se obtuvo utilizando el contenido de humedad de saturación, cuyo resultado se expresó como porcentaje (%), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{W_t - W_d}{W_d} \cdot 100$$

Ecuación 13

La capacidad de retención de agua (CRA) se obtuvo con la ecuación 14, donde W_e es el peso del frijol rehidratado cuando éste ha alcanzado el contenido de humedad de saturación y W_d es el peso del frijol precocido deshidratado.

$$CRA = \frac{W_e}{W_d} \quad \text{Ecuación 14}$$

La humedad relativa del rehidratado (HRR) se calculó con la ecuación 15, donde M_r es la humedad de la muestra rehidratada (g agua/100 g s.s.) y M_c es la humedad de la muestra cocida (g agua/100 g s.s.).

$$HRR = \frac{M_r}{M_c} \quad \text{Ecuación 15}$$

Para el estudio de la cinética de rehidratación se utilizaron tres modelos matemáticos: el modelo de Peleg, el modelo de Primer Orden y el modelo Sigmoide. El modelo cinético de Peleg aplica a la ganancia de peso durante la rehidratación (Peleg, 1988; Kapsto *et al.*, 2008) asumiendo la forma:

$$W(t) = W_0 + \frac{t}{C_1 + C_2 \cdot t} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde W_0 es el peso de las semillas después del tiempo t , W_0 es el peso inicial de la muestra de las semillas sin remojo y C_1 y C_2 son la primera y segunda constantes de Peleg. De acuerdo a este modelo, el peso de equilibrio, W_{eq} , es decir, cuando $t \rightarrow \infty$, es dado por:

$$W_{eq} = W_0 + \frac{1}{C_2} \quad \text{Ecuación 17}$$

En el modelo de rehidratación de Primer Orden (exponencial), la ecuación utilizada fue la siguiente (Gowen *et al.*, 2007b):

$$W = K + (W_0 - K) \exp(-k_1 t) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde $K = k_0/k_1$ es la relación de las constantes cinéticas, y k_0 y k_1 son las constantes cinéticas de orden cero y de primer orden. Cuando se alcanza el equilibrio, W_{eq} , el valor del contenido de agua, se obtiene como sigue:

$$W_{eq} = K = \frac{k_0}{k_1} \quad \text{Ecuación 19}$$

Además de lo anterior, el modelo matemático Sigmoide fue también contrastado.

$$W(t) = \frac{W_{eq}}{1 + \exp[-k \cdot (t - \tau)]} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde, $W(t)$ es el contenido de humedad de las semillas como una función del tiempo de remojo, t , W_{eq} es el contenido de humedad de equilibrio y k (min^{-1}) es la constante de velocidad de rehidratación. El tiempo de remojo, τ (min), se define como el tiempo necesario para alcanzar saturación media (50%) de las semillas.

Para el ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos, se realizó un análisis de regresión no lineal por el método Simplex-Quasi-Newton, mediante el uso del programa *Stajística 9.0®*. Los valores de los parámetros cinéticos de los modelos de Peleg, Primer Orden y Sigmoide, se estimaron en función de la temperatura de remojo.

Con el fin de eliminar el efecto del radio de la semilla en la constante de velocidad de hidratación, la difusividad efectiva se calculó en analogía con la solución analítica para una dimensión de la ley de difusión de Fick, con difusividad constante de humedad para una esfera (Riva y Peri, 1986), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}$$

Ecuación 21

donde D_{eff} expresada en $m^2 s^{-1}$ es la difusividad efectiva, k (s^{-1}) es la constante de velocidad de hidratación para el modelo de Primer Orden (Ecuación 18) y r es el radio de la semilla, el cual es la mitad del diámetro geométrico. Los coeficientes de difusividad reportados se correlacionaron contra el recíproco de la temperatura absoluta, de acuerdo con la ecuación del tipo Arrhenius:

$$D_{eff} = D_0 \left[\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right]$$

Ecuación 22

Donde D_0 es la difusividad para una temperatura infinita, E_a es la energía de activación para la difusión de la humedad, R es la constante universal de los gases (8.31 J/mol K) y T es la temperatura absoluta de remojo (expresada en $^{\circ}C$). El valor de E_a ($Kj \text{ mol}^{-1}$) se calculó por regresión lineal del $\ln(D_{eff})$ con respecto a $1/T$.

6.7 Análisis estadístico

Para el proceso de deshidratación se utilizó un diseño factorial 2^2 , donde la aleatorización fue completamente al azar, con tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue de 400 g de semillas de frijol precocido (tabla 13).

Tabla 13. Diseño de experimento para deshidratación

Factores	Nivel	
	1	2
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	25	30
Velocidad del aire (m s^{-1})	0.5	1.0

Los resultados de los experimentos de deshidratación y rehidratación se analizaron estadísticamente a través de un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de medias (Tukey) con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. La bondad de ajuste de los datos experimentales a cada modelo matemático se evaluó en función del coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE), chi-cuadrada (χ^2), eficiencia del modelo (EF) y del error promedio porcentual (P_0 , %).

VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Cinética de deshidratación

Las semillas precocidas de frijol (67 ± 0 g agua/100 g s.s) se deshidrataron hasta alcanzar un peso constante (11.7 ± 0.7 g agua/100 g s.s). El valor del contenido de humedad (RX) disminuyó con el tiempo de secado a un valor asintótico de 0 en 40, 36, 38 y 27 h para los tratamientos T1, T2, T3 y T4, respectivamente (figura 4).

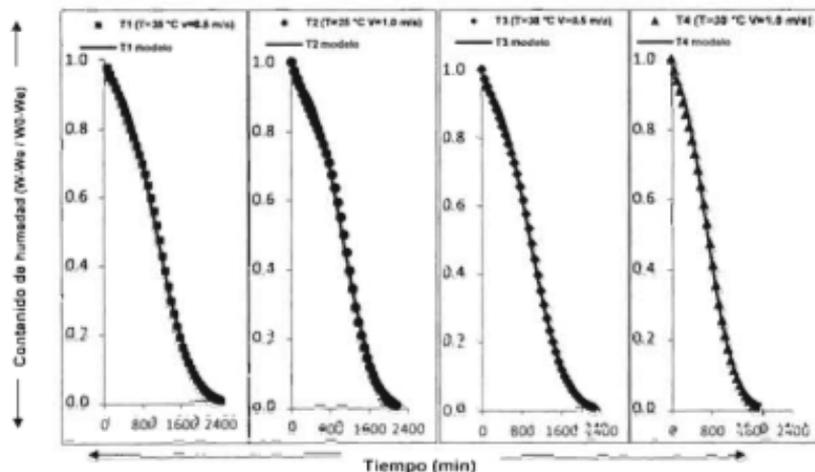


Figura 4. Relación del contenido de humedad en función del tiempo para semillas frijol precocido.

Los datos experimentales obtenidos de las cinéticas de deshidratación, se ajustaron a 13 modelos matemáticos con amplio uso en ingeniería de alimentos (tabla 12). Los valores de los estimadores estadísticos, coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE), chi-cuadrada (χ^2), eficiencia del modelo (EF) y error promedio porcentual (P_0 , %), de los modelos matemáticos estudiados se presentan en las tablas 15a y 15b. De acuerdo a esos resultados, el modelo de Page

presentó los valores de R^2 (0.9836 a 0.9939) y EF (0.9835 a 0.9937) más altos, y los valores más bajos de RMSE (0.0276 a 0.0448), χ^2 (0.3328 a 0.9353) y P_0 (2.3179 a 3.5304). Por lo tanto, el modelo de Page fue seleccionado como la mejor representación del comportamiento cinético de secado de semillas de frijol precocido, independientemente de la temperatura del aire de secado y de la velocidad de aire.

La validación del modelo de Page se realizó por la comparación del contenido de humedad obtenido de los datos experimentales y los valores predichos por el modelo, para las diferentes condiciones experimentales. Los valores predichos y experimentales fueron contrastados gráficamente observando una estrecha línea recta entre ambos (figura 5). Este comportamiento indica que el modelo de Page puede usarse para describir el comportamiento de deshidratación de frijol precocido deshidratado.

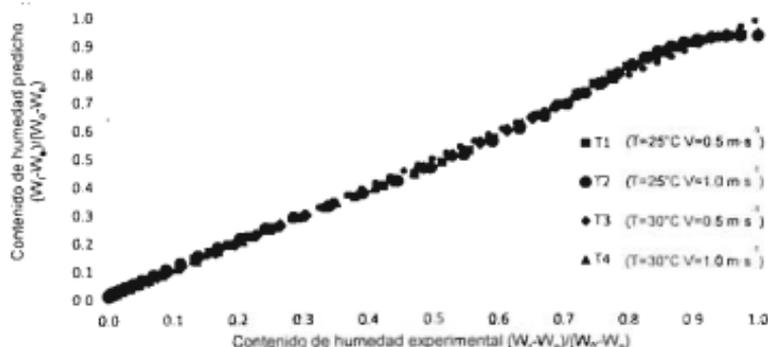


Figura 5. Valores predichos y experimentales del contenido de humedad adimensional de semillas de frijol precocido deshidratado.

Los valores estimados de los parámetros cinéticos para el modelo de Page a diferentes temperaturas y velocidades del aire se presentan en la tabla 14. Los valores del coeficiente k aumentan en función del incremento de la temperatura y velocidad del aire de deshidratación, evidenciando la reducción de la resistencia

interna de difusión de agua con el aumento de dichas variables. Sin embargo, este comportamiento fue inverso para el coeficiente n .

Tabla 14. Parámetros cinéticos obtenidos para el modelo de Page.

Tratamiento	T (°C)	Velocidad del aire (m·s ⁻¹)	K	n
T1	25	0.5	7.0 x 10 ⁻⁴	2.3688
T2	25	1.0	6.0 x 10 ⁻⁴	2.4698
T3	30	0.5	10.0 x 10 ⁻⁴	2.3109
T4	30	1.0	26.0 x 10 ⁻⁴	2.2046

Los valores son resultado de $n = 3$.

Las ecuaciones para estimar los coeficientes k y n , son las siguientes:

$$k = 0.0004 \cdot X^2 - 0.0015 \cdot X + 0.0018 \quad R^2 = 0.99$$

$$n = -0.0518 \cdot X^2 + 0.194 \cdot X + 2.2423 \quad R^2 = 0.87$$

De acuerdo a Henderson y Pabis (1961), la resistencia al movimiento de la humedad en la superficie es insignificante en comparación con la resistencia interna para un flujo turbulento, el cual se produce en la mayoría de los secadores. Sin embargo, Islam y Flink (1982) señalaron que a velocidades de aire de 2.5 m·s⁻¹ o menos, la resistencia al transporte de la masa externa es importante y debe considerarse en el análisis de los datos de secado. Este estudio demostró que este es el caso de las velocidades del aire y temperaturas en este estudio, debido al incremento de 3.71 veces observado en la constante K al aumentar la temperatura (25°C) y velocidad del aire (0.5 m·s⁻¹) hasta 30°C y 1.0 m·s⁻¹.

Tabla 15a. Parámetros cinéticos y estimadores estadísticos de los diferentes modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales de deshidratación.

Modelo N°	Tratamiento	Constantes	RMSE	χ^2	EF	P _e %	R ²
1	T1	a= 1.5660; k= 0.2227	0.107084	5.188598	0.905327	9.764805	0.914211
	T2	a= 1.6046; k= 0.2453	0.120992	5.426801	0.880630	10.953302	0.890159
	T3	a= 1.3068; k= 0.0396	0.108272	5.062615	0.903758	9.748108	0.912323
	T4	a= 1.1467; k= -0.1081	0.098236	3.551286	0.921019	8.879712	0.929524
2	T1	a= 5.0394; k= -0.4615; b= -2.1435	0.053770	0.989783	0.976130	4.598839	0.976130
	T2	a= 11.18; k= 0.1177; b= -11.55	0.058290	1.012703	0.971336	5.009756	0.971337
	T3	a= 1.6037; k= 0.4373; b= -1.4524	0.063136	2.406124	0.967275	5.174268	0.967274
	T4	a= 6.4935; k= -1.1940; b= -0.9461	0.052763	0.690178	0.977215	4.516638	0.977215
3	T1	a= 2.3434; k= -0.0062	0.067464	2.824683	0.962423	6.019528	0.967986
	T2	a= 2.3820; k= -0.0002	0.080829	3.139518	0.946726	7.174647	0.953915
	T3	a= 1.0001; k= -0.2277	0.108272	5.062615	0.903758	9.748108	0.912323
	T4	a= 2.2969; k= -0.0604	0.058013	1.781305	0.972455	5.175912	0.976912
4	T1	a= -387.15; k= -0.0263; b= 0.9960	0.060335	2.311312	0.969945	5.363792	0.973838
	T2	a= -387.15; k= -0.0263; b= 0.9960	0.073227	2.624419	0.956275	6.491771	0.961508
	T3	a= -289.53; k= -0.0405; b= 0.9950	0.065440	2.398497	0.964842	5.553248	0.968240
	T4	a= -295.46; k= -0.0990; b= 0.9951	0.051292	1.421562	0.978468	4.511879	0.981476
5	T1	a= -0.0482; k= -0.2138; b= 1.0604	0.107084	5.188598	0.905327	9.764805	0.914211
	T2	a= -0.0767; k= -0.1824; b= 1.1137	0.120993	5.431539	0.880629	10.853659	0.890306
	T3	a= -0.1276; k= -0.1600; b= 1.1976	0.108272	5.062615	0.903758	9.748108	0.912323
	T4	a= 0.2991; k= -0.5007; b= 0.4753	0.098236	3.551291	0.921019	8.879712	0.929524
6	T1	a= 0.6382; k= -3.2198; b= 21.24; g= 0.1201; c= -34.45; h= 0.1250	0.060351	2.312642	0.969929	5.364811	0.973833
	T2	a= 0.4862; k= -3.6058; b= 20.53; g= 0.1262; c= -35.41; h= 0.1315	0.073244	2.623931	0.956255	6.493484	0.961464
	T3	a= 66.10; k= -0.9052; b= -54.44; g= 0.1327; c= -87.95; h= 0.1327	0.065441	2.395501	0.964842	5.552826	0.968201
	T4	a= 0.6218; k= 0.2015; b= 0.6297; g= 0.0840; c= 0.0777; h= 0.0840	0.098236	3.551291	0.921019	8.879712	0.929524

Los datos representan el promedio de $n = 3$

Tabla 15b. Parámetros cinéticos y estimadores estadísticos de los diferentes modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales de deshidratación.

Modelo N°	Tratamiento	Constantes	RMSE	χ^2	EF	P ₀ %	R ²
7	T2	k= -0.2276	0.120992	5.426801	0.880630	10.953302	0.890159
	T3	k= -0.2277	0.108272	5.062615	0.903758	9.748108	0.912323
	T4	k= -0.2450	0.098236	3.551291	0.921019	8.879712	0.929524
8	T1	k= -0.0007; n= 2.3688	0.031096	0.564960	0.992016	2.451397	0.992216
	T2	k= -0.0006; n= 2.4698	0.036198	0.614208	0.989316	2.906605	0.989705
	T3	k= -0.0010; n= 2.3109	0.044793	0.935268	0.983528	3.530417	0.983631
	T4	k= -0.0020; n= 2.2046	0.027619	0.332832	0.993757	2.317895	0.993861
9	T1	k= -0.1608; n= 0.3628	0.107085	5.187684	0.905327	9.764520	0.914190
	T2	k= -0.1986; n= 0.3002	0.120992	5.426801	0.880630	10.953302	0.890159
	T3	k= -0.2102; n= 0.3011	0.108272	5.062616	0.903758	9.748108	0.912323
	T4	k= -0.2922; n= 0.2874	0.098236	3.551291	0.921019	8.879712	0.929524
10	T1	a= 1.0728; k= 0.0876; n= 2.5 E ⁻⁵ ; b= -0.029	0.058009	1.172331	0.972218	4.592054	0.972225
	T2	a= 0.7673; k= -0.2052; n= 0.3305; b= -0.0357	0.057532	0.968490	0.973010	4.638728	0.973010
	T3	a= 0.7673; k= -0.2052; n= 0.3305; b= -0.0357	0.044062	0.847291	0.984061	3.418020	0.984061
	T4	a= 0.5312; k= -0.5931; n= 2.0953; b= -0.0009	0.026492	0.329337	0.994256	2.166888	0.994256
11	T1	a= 1.0632; b= 0.0488	0.141883	7.985983	0.833799	12.994436	0.856634
	T2	a= 1.8566; b= 0.0298	0.120992	5.426768	0.881459	10.953300	0.890158
	T3	a= 1.8328; b= 0.0316	0.108272	5.062584	0.903758	9.748100	0.912323
	T4	a= 1.7036; b= 0.0423	0.098264	3.514330	0.920973	8.883723	0.928456
12	T1	a= -0.0302; b= 0.0001	0.059180	1.164750	0.971085	5.089616	0.974936
	T2	a= -0.0283; b= -0.0001	0.062463	1.117347	0.968186	5.047981	0.969631
	T3	a= -0.0324; b= 0.0001	0.067801	1.482514	0.962260	5.542459	0.964375
	T4	a= -0.0459; b= 0.0003	0.058314	0.816531	0.972169	5.005060	0.975500
13	T1	a= 0.7503; k= -0.2759; g= 0.0583	0.107084	5.188599	0.905330	9.764805	0.914211
	T2	a= -85.73; k= -0.1311; g= 0.1277	0.073230	2.624545	0.956272	6.491586	0.961501
	T3	a= 0.5694; k= -0.3363; g= 0.0633	0.108272	5.062615	0.903758	9.748108	0.912323
	T4	a= -14.01; k= -0.0089; g= 0.0174	0.052231	0.678030	0.977672	4.462535	0.977672

Los datos representan el promedio de $n = 3$

Distintos investigadores han informado que el modelo de Page predice adecuadamente el secado de una amplia variedad de cultivos como el arroz (Ondier *et al.*, 2010), chicharos (Jadhav *et al.*, 2010), frijol soya (Gowen *et al.*, 2008), ejotes

(Doymaz, 2005), ajo (Sacilik y Unal, 2005), grosella (Methakhup *et al.*, 2005) y tomates cherry (Azoubel y Murr, 2004).

7.2 Efecto del método de deshidratación sobre la calidad de frijol precocido deshidratado

En la tabla 16 se observa el efecto del proceso de deshidratación sobre los principales indicadores de calidad en frijol precocido después del deshidratado. En el caso de SC, no se observó efecto alguno durante el proceso de deshidratado en ninguno de los tratamientos, concluyendo que este indicador es totalmente controlado con las condiciones propuestas en este estudio. El análisis estadístico para determinar el efecto de AC dio como resultado que los tratamientos T₁, T₂ y T₃ presentaron valores bajos (2.90 a 3.93 %) de semillas dañadas con respecto al tratamiento T₄ (5.87%) con un nivel de significancia ($P < 0.05$).

Tabla 16. Efecto del proceso de deshidratación sobre la calidad final de frijol precocido deshidratado

Tratamiento	T (°C)	Velocidad del aire (m·s ⁻¹)	Abertura de cotiledones (%)	Separación de cotiledones (%)
T ₁	25	0.5	2.90 ^b ± 0.36	*
T ₂	25	1	3.93 ^b ± 0.90	*
T ₃	30	0.5	2.91 ^b ± 0.51	*
T ₄	30	1	5.87 ^a ± 0.65	*

Los datos representan el promedio y la desviación estándar ($n = 3$). * No observado.

Literales diferentes dentro de una columna indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

La apertura y separación de cotiledones de productos de semillas procesadas ocurren principalmente durante la etapa de deshidratación (figura 3). Dicho problema se provoca principalmente por el diferencial de las velocidades de deshidratación entre el pericarpio y los cotiledones de la semilla, lo cual causa que la capa externa de la semilla se deshidrate más rápidamente generando su encogimiento (Dorsey *et al.*, 1961). Pan *et al.* (2010) desarrollaron un método de detección de AC y SC previo al procesamiento de las semillas (escaldado, remojo, cocción y deshidratado). Dicho

método se fundamentó en la detección por medio del impacto acústico y separación por densidad de las semillas. Estos investigadores encontraron que las semillas crudas con alto nivel de señal al impacto acústico (AC = 10.2% y SC = 10.7%) y alta densidad (AC = 13.4% y SC = 17.1%) después del proceso de deshidratación (35°C por 1 h, 52°C por 1 h y 72°C por 2 horas), mostraron una reducción considerable de la pérdida de calidad en comparación de semillas con bajo nivel de impacto acústico y baja densidad. Sin embargo, aunque estos métodos pueden predecir la pérdida de calidad previo al deshidratado de frijol precocido, las tasas de eliminación de humedad bajas durante la deshidratación evita y reduce significativamente la pérdida de calidad de frijol precocido deshidratado, tal y como se demostró en esta investigación.

En los últimos años, la deshidratación por microondas ha ganado popularidad como método alternativo de deshidratación para una amplia variedad de productos alimenticios y agrícolas. El secado por microondas puede reducir considerablemente el tiempo de deshidratación de productos biológicos sin degradación de la calidad (Mujumdar y Law, 2010; Vadivambal y Jayas, 2007). La deshidratación de garbanzos cocidos y de frijol soja utilizando una combinación de microondas y secado por convección genera productos altamente rehidratables en tiempos cortos de deshidratación (Gowen *et al.*, 2006b, 2008). Sin embargo, se estima que en el caso de la deshidratación de frijol precocido, la pérdida de humedad acelerada por microondas conduciría a una alta incidencia de AC y SC. Este problema, especialmente el relativo a la AC, limitaría la producción y aceptación comercial de productos de frijol precocido deshidratado por microondas, debido al efecto negativo causado sobre la apariencia del producto terminado. El proceso de deshidratación de frijol precocido a baja temperatura y baja velocidad del aire, si bien, conduce a tiempos prolongados de deshidratación del producto precocido, es un método que produce semillas con pérdidas inapreciables y de calidad aceptable para la industria y consumidores. Resultados similares (1.20 ± 0.13 % AC) fueron reportados en frijol de la variedad Canario por Ulloa *et al.* (2013).

7.3 Propiedades físicas de frijol precocido deshidratado

En la tabla 17 se muestran las características físicas de las semillas de frijol previo y posterior al proceso de deshidratación. Los valores de longitud (L) de las semillas no mostraron diferencia significativa ($P > 0.05$). El ancho (A) y espesor (E) de las semillas crudas presentaron valores más altos y bajos, respectivamente, en comparación con semillas precocidas deshidratadas ($P < 0.05$). En relación a L, A y E, se observó que la esfericidad (α), diámetro geométrico (D_g), área superficial (S) y volumen (V_g) aumentaron significativamente ($P < 0.05$) en semillas precocidas deshidratadas, probablemente debido al efecto de plastificado ocurrido durante el escaldado y la cocción lo cual favorece el aumento de los espacios intracelulares al incrementarse la ganancia de humedad por efecto de la temperatura en el alimento (Gowen *et al.*, 2007b; Abu-Ghannam y Mckenna, 1997a). Estos resultados caen dentro del intervalo reportado para frijol variedad ojo negro por Kapsto *et al.* (2008) con valores de diámetro geométrico de 0.54 a 0.73, área superficial de 0.90 a 1.97, esfericidad de 0.73 a 0.80 y volumen de 0.06 a 0.16. Por otra parte, el peso promedio de 100 semillas presentó una disminución significativa en las semillas procesadas con respecto a la semilla cruda. Este efecto es causado posiblemente por la pérdida de sólidos ocurrida durante el proceso de remojo y cocción (Wang *et al.*, 2010). El valor del peso promedio de 100 semillas en esta investigación fue similar a lo reportado por Allende *et al.* (2006) con un valor promedio de 0.26 g para muestras de frijol variedad azufrado tapatio y de 0.11 a 0.23 g para frijol de variedad ojo negro, de acuerdo a lo reportado por Kapsto *et al.* (2008). Los cambios en el color de semillas precocidas deshidratadas, fueron explicados por los parámetros L^* , a^* y b^* . La luminosidad (L^*) y el color amarillo (b^*) de las semillas, presentaron una reducción significativa ($P < 0.05$) después del proceso de escaldado, remojo, cocción y deshidratación. Por el contrario, el parámetro a^* mostró un aumento en el color rojo después del procesamiento de las semillas. Los factores más comunes que pueden afectar al color de los alimentos durante el procesamiento son la degradación de pigmentos, reacciones de pardeamiento, la oxidación de ácido ascórbico, la acidez y la presencia de hierro y cobre en el medio de cocción (Bayram *et al.*, 2004). La

disminución en el color rojo y amarillo de las leguminosas se podría explicar por la degradación de pigmentos durante la cocción, mientras que el proceso de oscurecimiento puede ser causado por la presencia de metales durante la cocción resultando como aumento del color rojo o amarillo (Guzel y Sayar, 2012). En este estudio, la disminución del color amarillo de frijol precocido podría ser debido a la degradación de los pigmentos durante la cocción, reacciones de Maillard y la presencia de alto contenido de minerales. Resultados similares fueron reportados por Nilgün (2011) en frijol común, después de someter las semillas a remojo (agua destilada, ácido ascórbico 0.5% y carbonato de sodio 0.5%) por 12 horas y posterior cocción con tres métodos, cocción atmosférica a 90°C por tres minutos ($L^* \sim 48.25$, $a^* \sim 2.71$ y $b^* \sim 15.14$), cocción a presión a 122°C por 15 minutos ($L^* \sim 49.47$, $a^* \sim 3.21$ y $b^* \sim 13.67$) y cocción por microondas a 750w por 20 minutos ($L^* \sim 60.02$, $a^* \sim 1.07$ y $b^* \sim 10.91$).

Tabla 17. Características físicas de semillas de frijol crudo y precocido deshidratado

Parámetros	Condiciones experimentales				
	Semilla cruda	Deshidratación			
		25 °C		30 °C	
		0.5 m s ⁻¹	1.0 m s ⁻¹	0.5 m s ⁻¹	1.0 m s ⁻¹
L (cm)	1.06 ± 0.06 ^a	1.07 ± 0.03 ^a	1.07 ± 0.04 ^a	1.08 ± 0.04 ^a	1.08 ± 0.04 ^a
A (cm)	0.66 ± 0.06 ^a	0.65 ± 0.04 ^b	0.66 ± 0.04 ^b	0.66 ± 0.03 ^b	0.65 ± 0.03 ^b
E (cm)	0.46 ± 0.03 ^c	0.51 ± 0.02 ^{ab}	0.52 ± 0.03 ^a	0.50 ± 0.03 ^b	1.07 ± 0.02 ^a
Esféricidad Ø	0.65 ± 0.03 ^b	0.66 ± 0.01 ^a	0.67 ± 0.02 ^a	0.66 ± 0.01 ^{ab}	0.66 ± 0.02 ^a
Diámetro geométrico (cm)	0.69 ± 0.03 ^b	0.71 ± 0.02 ^b	0.72 ± 0.03 ^b	0.71 ± 0.02 ^a	0.71 ± 0.02 ^a
Área superficial (cm ²)	1.49 ± 0.13 ^d	1.57 ± 0.09 ^a	1.61 ± 0.12 ^a	1.57 ± 0.11 ^a	1.61 ± 0.09 ^a
Volumen (cm ³)	0.12 ± 0.02 ^b	0.13 ± 0.01 ^a	0.13 ± 0.02 ^a	0.13 ± 0.01 ^a	0.13 ± 0.01 ^a
Peso 100 semillas (g)	0.23 ± 0.0 ^a	0.21 ± 0.0 ^b	0.20 ± 0.1 ^b	0.19 ± 0.1 ^b	0.19 ± 0.0 ^b
L*	61.80 ± 1.58 ^a	45.42 ± 6.94 ^d	42.10 ± 4.72 ^d	42.60 ± 5.15 ^d	44.89 ± 2.61 ^d
a*	-0.45 ± 0.56 ^b	7.62 ± 0.57 ^a	7.71 ± 0.68 ^a	7.95 ± 0.78 ^a	7.79 ± 0.70 ^a
b*	39.92 ± 1.82 ^a	29.12 ± 3.16 ^b	29.62 ± 2.21 ^b	25.22 ± 4.65 ^b	29.54 ± 0.67 ^b

Promedios con diferente superíndice a lo largo de las filas son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

7.4 Composición proximal y análisis fisicoquímicos de semillas

Las semillas precocidas deshidratadas a diferente temperatura y velocidad del aire, mostraron una reducción significativa ($P < 0.05$) de los contenidos de humedad, proteína cruda, grasa cruda, cenizas y actividad de agua, con respecto al valor inicial de las semillas crudas. En el caso del contenido de humedad, dicha reducción está directamente relacionada con la disminución de la actividad de agua (a_w) de las semillas precocidas deshidratadas, observando que el incremento de temperatura (30°C) y velocidad del aire (0.5 y $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), provoca una reducción significativa ($P < 0.05$) de ambos parámetros con respecto a la semilla cruda.

Tabla 18. Composición química proximal y algunas características fisicoquímicas de semillas de frijol crudo y precocido deshidratado.

Parámetros	Condiciones experimentales				
	Semilla cruda	Deshidratación			
		25°C		30°C	
		0.5 m·s ⁻¹	1.0 m·s ⁻¹	0.5 m·s ⁻¹	1.0 m·s ⁻¹
Humedad (%)	13.52 ± 0.05 ^a	12.78 ± 0.29 ^b	11.82 ± 0.57 ^{bc}	11.26 ± 0.13 ^c	10.94 ± 0.55 ^c
Proteína cruda(%)	27.75 ± 0.95 ^a	24.57 ± 0.36 ^b	24.98 ± 0.84 ^b	24.23 ± 1.06 ^b	22.75 ± 0.93 ^b
Grasa cruda (%)	4.36 ± 0.81 ^a	0.51 ± 0.06 ^c	1.68 ± 0.33 ^c	1.81 ± 0.35 ^c	2.97 ± 0.06 ^b
Cenizas (%)	4.97 ± 0.03 ^b	2.28 ± 0.02 ^b	2.17 ± 0.03 ^b	2.22 ± 0.08 ^b	2.23 ± 0.06 ^b
Actividad de agua	0.69 ± 0.00 ^b	0.67 ± 0.01 ^{ab}	0.66 ± 0.01 ^{ab}	0.63 ± 0.00 ^b	0.58 ± 0.04 ^c

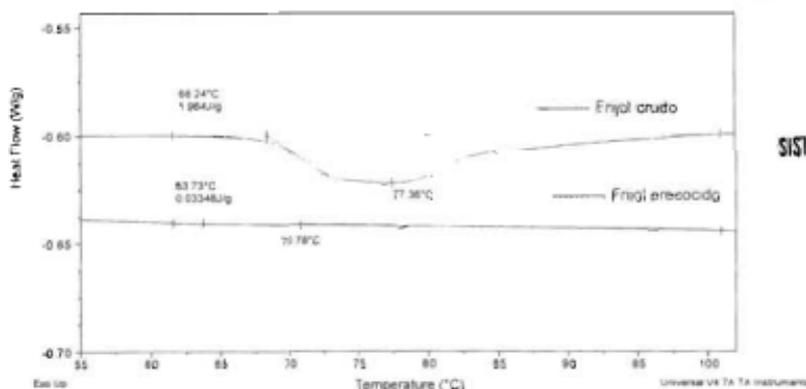
Los datos representan el promedio ± la desviación estándar ($n = 3$) Promedios con el mismo superíndice a lo largo de las filas no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

Por otra parte, el contenido de cenizas de las semillas precocidas mostró un valor promedio de 2.22 ± 0.04 %. Esta disminución en el contenido de cenizas puede ser resultado de la pérdida de sólidos ocurrida durante el proceso de remojo y cocción, lo cual provoca la reducción de algunos minerales de interés nutricional como magnesio y potasio (Wang *et al.*, 2010). Resultados similares fueron reportados por Martínez-Meyer *et al.* (2013) (proteína ~ $23.4 \pm 0.9\%$, cenizas ~ $4.5 \pm 0.3\%$, grasa ~ $0.9 \pm 0.1\%$) y Almeida-Costa *et al.* (2008) (proteína ~ 22.1 ± 2.1 ,

cenizas $\sim 3.15 \pm 0.2$, grasa $\sim 2.52 \pm 0.1$, humedad $\sim 5.29 \pm 1.84$) en semillas de frijol común crudas y precocidas liofilizadas, respectivamente. Además, Wang *et al.* (2010) reportaron contenidos de proteína de $25.9 \pm 1.7\%$, cenizas de $3.3 \pm 0.3\%$ y grasa de $1.5 \pm 0.3\%$ en semillas de frijol cocidas de las variedades pinto y kidney, valores que se encuentran dentro del intervalo observado para las semillas de frijol precocido deshidratado de la variedad azufrado (tabla 18).

7.5 Propiedades térmicas de frijol precocido deshidratado

La figura 6 muestra las transiciones térmicas asociadas a las semillas de frijol de la variedad azufrado, tanto en su estado crudo como después de haberse sometido al tratamiento térmico (escaldado, hidratación y cocción).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL NATAL



SISTEMA DE BIBLIOTECA

Figura 6. Termograma de semillas de frijol crudo y después de ser sometido al proceso térmico de escaldado, remojo y cocción.

Las semillas de frijol crudo presentaron una endoterma caracterizada por la gelación del almidón y los diferentes tipos de proteína presentes en la semilla. Las proteínas resistentes al calor son definidas como aquellas con desnaturalización por encima del punto de ebullición del agua. Por lo tanto, las proteínas presentes en las

semillas de frijol variedad azufrado se pueden considerar como no resistentes al calor, debido a su baja temperatura de pico máximo (77.36 °C).

El valor obtenido para la energía total asociada con las semillas de frijol crudo fue de 1.964 J/g. En el caso de semillas de frijol sometidas al tratamiento térmico (escaldado, hidratación y cocción) el valor obtenido fue de 0.0335 J/g. Aplicando la ecuación 12, se obtuvo que el grado de cocción para semillas de frijol precocido fue de 98.29 %. Espinosa-Andrews y Sánchez-Arteaga, (2010) reportaron para frijol crudo de la variedad azufrado valores de energía total de 1.347 J/g y de 0.07520 J/g para frijol cocido después de 120 minutos a 93°C. Además, Biswas y Kayastha (2002) reportaron valores de temperatura de transición de 80°C hasta 100°C en proteínas (leucoaglutinas) de frijol *Phaseolus vulgaris* L. Las propiedades térmicas de las semillas de frijol es uno de los parámetros de calidad más importantes a nivel industrial. Por lo tanto, las semillas de frijol de la variedad azufrado es un alimento que puede ser utilizado industrialmente debido a su bajo grado de cocción en comparación con otras variedades de semillas.

7.6 Cinéticas de rehidratación

Las cinéticas de absorción de agua de las semillas de frijol precocido deshidratado fueron comparadas por efecto del remojo en agua purificada (40, 60 y 80 °C) (figura 7). Las curvas se caracterizaron por una fase inicial de alta absorción de agua seguida por una fase de equilibrio, durante la cual las semillas de frijol precocido deshidratado alcanzaron su capacidad de rehidratación máxima. Los resultados indicaron que el aumento de la temperatura de remojo, incrementó la absorción de agua en la fase inicial de la pendiente, lo que condujo a alcanzar la fase de equilibrio con mayor rapidez. La rápida absorción inicial de agua se atribuye al llenado de capilares en la superficie de la semilla. Por el contrario, la disminución de las tasas de hidratación en la etapa final se relaciona con la ocupación de los espacios libres y los capilares intercelulares con agua, señalando el equilibrio y el contenido de humedad de saturación de las semillas (Haladjian *et al.*, 2003). Este

comportamiento ha sido reportado en semillas de frijol soja y garbanzos por Gowen *et al.* (2007a,b).

Las propiedades de rehidratación del frijol precocido deshidratado fueron evaluadas de acuerdo a los indicadores de calidad (CR, CRA y HRR) con mayor uso en alimentos (tabla 19). Las semilla precocidas deshidratadas a alta temperatura y alta velocidad de aire, incrementaron significativamente ($P < 0.05$) los contenidos de equilibrio para los indicadores de capacidad de rehidratación (CR) y capacidad de retención de agua (CRA). Por otra parte, la humedad relativa del rehidratado (HRR) presentó valores cercanos a 1 (adimensional) en todas las condiciones experimentales. Dicho valor demuestra que, bajo las diferentes condiciones de deshidratación utilizadas en este estudio, se producen semillas precocidas rehidratables con propiedades similares al producto precocido inicial y de calidad aceptable para el consumidor final.

Tabla 19. Propiedades de rehidratación de semillas de frijol precocido deshidratado.

Tratamiento	T (°C)	Velocidad del aire (m·s ⁻¹)	Indicador		
			CR	CRA	HRR
T ₁	25	0.5	145.5 ^{ab} ± 0.8	2.39 ^b ± 0.01	0.95 ^a ± 0.01
T ₂	25	1.0	141.3 ^b ± 2.7	2.36 ^b ± 0.02	0.95 ^a ± 0.01
T ₃	30	0.5	149.5 ^a ± 1.3	2.44 ^a ± 0.02	0.96 ^a ± 0.00
T ₄	30	1.0	147.7 ^a ± 3.1	2.44 ^a ± 0.03	0.95 ^a ± 0.02

Los datos representan el promedio ± la desviación estándar (n = 3). Literales diferentes dentro de una columna indican diferencia significativa ($P < 0.05$). CR: %. CRA: g agua/g frijol precocido deshidratado. HRR: adimensional (0 a 1).

Este efecto ha sido directamente relacionado con las condiciones de deshidratación al cual se somete el alimento (Maskan, 2001). Por lo tanto, la capacidad de rehidratación y la capacidad de retención de agua son índices numéricos que tienen que ver con la estructura, tejido y la capacidad de mantener el agua absorbida por el alimento. Valores similares de estos indicadores han sido

reportados con anterioridad en diferentes leguminosas como frijol soya, CR ~134% (Gowen *et al.*, 2008), garbanzo, CR ~ 158.97%, CRA ~ 2.55 a 2.67, CRHR ~ 0.94 a 0.98 (Gowen *et al.*, 2006a) y frijol canario, CR ~ 127.6 y 146.7% (Ulloa *et al.*, 2013).

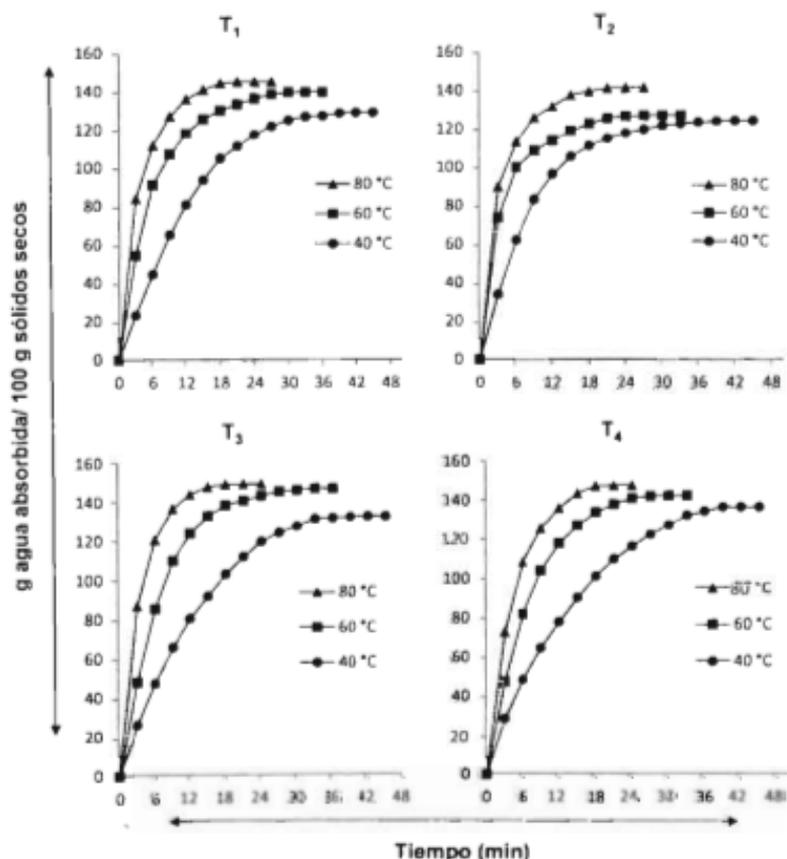


Figura 7. Efecto de la temperatura en la absorción de agua de frijol precocido deshidratado

Los parámetros generados de la aplicación de los diferentes modelos matemáticos (Peleg, Primer Orden y Sigmoide) que describen la cinética de absorción de agua para las semillas de frijol precocido deshidratado se presentan en las tablas 20 - 22. En las diferentes condiciones de rehidratación se observaron altos valores de R^2 y EF y valores bajos de RMSE, x^2 y P (%) para la mayoría de los casos, sugiriendo que los modelos describen claramente la absorción de agua en las semillas precocidas. En todos los casos se observó un comportamiento hiperbólico caracterizado por una alta velocidad inicial de absorción de agua, seguido de un equilibrio asintótico. Este comportamiento se ha reportado por otros investigadores para algunas semillas procesadas como frijol soya y frijol rojo kidney (Gowen *et al.*, 2008; Abu-Ghannam, 1998).

El contenido máximo de humedad (w_{eq}) observado en cada tratamiento fue de $1.31 \pm 0.05 \text{ g.g}^{-1}$ a 40°C , $1.40 \pm 0.04 \text{ g.g}^{-1}$ a 60°C y $1.46 \pm 0.03 \text{ g.g}^{-1}$ a 80°C (tabla 20 - 22). Los valores más altos de absorción de humedad (1.50 y 1.48 g.g^{-1}) se observaron para semillas deshidratadas a temperatura de 30°C y velocidad del aire de 0.5 y 1.0 m.s^{-1} . Algunos estudios realizados por Gowen *et al.* (2008) mostraron un amplio rango de variación ($1.34 \pm 1 \text{ g.g}^{-1}$) en la capacidad de absorción de agua máxima, en semillas de frijol soya deshidratada por métodos combinados (microondas-aire caliente), pero con valores de equilibrio menores a los reportados en esta investigación. El contenido predicho de humedad de saturación obtenido por el modelo de primer orden, fue en general altamente cercano al contenido de humedad de saturación observado (tabla 21) Este no fue el caso para el modelo de Peleg, el cual mostró mayor dispersión entre los contenidos de humedad de saturación predichos y los valores experimentales. Además, la segunda constante del modelo de Peleg (C_2), la cual está relacionada con la capacidad de absorción de agua máxima de las semillas precocidas deshidratadas, no mostró cambios importantes en cada una de las condiciones de deshidratación, ni al incrementar la temperatura del agua de remojo de las semillas. Este comportamiento es similar al reportado por Kapsto *et al.* (2008) en semillas de frijol de la variedad ojo negro, en la

cual no se observaron cambios significativos por efecto del incremento de la temperatura de remojo.

Tabla 20. Características de absorción de agua de semillas de frijol precocidas deshidratadas siguiendo el modelo de Peleg.

Temperatura de remojo	Parámetros cinéticos	Condiciones Experimentales			
		25°C		30°C	
		0.5 m·s ⁻¹	1.0 m·s ⁻¹	0.5 m·s ⁻¹	1.0 m·s ⁻¹
40°C	W_{obs-eq} (g·g ⁻¹)	1.29	1.24	1.33	1.37
	W_{eq} (g·g ⁻¹)	1.50	1.37	1.56	1.59
	C_1 (min g H ₂ O ⁻¹ g s.s.)	3.78	2.50	3.84	3.92
	C_2 (g H ₂ O ⁻¹ g s.s.)	0.66	0.72	0.64	0.63
	R^2	1.00	0.99	1.00	1.00
	χ^2	0.006	0.013	0.006	0.002
	RMSE	0.02	0.03	0.02	0.01
	EF %	1.00	0.99	1.00	1.00
	P %	1.39	1.53	1.33	0.79
60°C	W_{obs-eq} (g·g ⁻¹)	1.38	1.31	1.47	1.43
	W_{eq} (g·g ⁻¹)	1.48	1.37	1.62	1.58
	C_1 (min g H ₂ O ⁻¹ g s.s.)	1.26	0.80	1.59	1.69
	C_2 (g H ₂ O ⁻¹ g s.s.)	0.67	0.73	0.61	0.63
	R^2	1.00	1.00	0.99	1.00
	χ^2	0.004	0.001	0.010	0.007
	RMSE	0.02	0.01	0.03	0.02
	EF %	1.00	1.00	0.99	1.00
	P %	0.62	0.27	1.13	1.00
80°C	W_{obs-eq} (g·g ⁻¹)	1.45	1.41	1.50	1.48
	W_{eq} (g·g ⁻¹)	1.52	1.47	1.58	1.60
	C_1 (min g H ₂ O ⁻¹ g s.s.)	0.66	0.58	0.64	0.95
	C_2 (g H ₂ O ⁻¹ g s.s.)	0.66	0.68	0.63	0.63
	R^2	1.00	1.00	1.00	1.00
	χ^2	0.003	0.0002	0.001	0.001
	RMSE	0.01	0.00	0.01	0.01
	EF %	1.00	1.00	1.00	1.00
	P %	0.21	0.17	0.42	0.39

R^2 es el coeficiente de correlación, χ^2 es el valor de chi-cuadrada, RMSE es el error cuadrático medio, EF es la eficiencia del modelo, P% es el error promedio porcentual, C_1 y C_2 son constantes del modelo, W_{eq} y W_{obs-eq} son el contenido de equilibrio de humedad predicho y observado, respectivamente.

Tabla 21. Características de absorción de agua de semillas de frijol precocidas deshidratadas siguiendo el modelo de primer orden.

Temperatura de remojo	Parámetros cinéticos	Condiciones experimentales			
		25°C		30°C	
		0.5 m·s ⁻¹	1.0 m·s ⁻¹	0.5 m·s ⁻¹	1.0 m·s ⁻¹
40°C	W_{obs-0} (g·g ⁻¹)	1.29	1.24	1.33	1.37
	W_{eq} (g·g ⁻¹)	1.29	1.23	1.33	1.36
	k_1 (min ⁻¹)	0.13	0.19	0.13	0.12
	k_0 (min ⁻¹ g H ₂ O/g s s)	0.17	0.24	0.17	0.17
	R^2	1.00	1.00	1.00	0.99
	χ^2	0.028	0.010	0.030	0.062
	RMSE	0.02	0.01	0.02	0.03
	EF %	1.00	1.00	1.00	0.99
	P %	1.35	0.84	1.26	2.18
60°C	W_{obs-0} (g·g ⁻¹)	1.38	1.31	1.47	1.43
	W_{eq} (g·g ⁻¹)	1.36	1.29	1.46	1.42
	k_1 (min ⁻¹)	0.32	0.45	0.25	0.25
	k_0 (min ⁻¹ g H ₂ O/g s s)	0.43	0.59	0.37	0.35
	R^2	1.00	0.99	1.00	1.00
	χ^2	0.014	0.011	0.009	0.016
	RMSE	0.02	0.02	0.01	0.02
	EF %	1.00	1.00	1.00	1.00
	P %	1.25	1.05	0.86	0.94
80°C	W_{obs-0} (g·g ⁻¹)	1.45	1.41	1.50	1.46
	W_{eq} (g·g ⁻¹)	1.43	1.39	1.48	1.46
	k_1 (min ⁻¹)	0.49	0.54	0.49	0.39
	k_0 (min ⁻¹ g H ₂ O/g s s)	0.70	0.75	0.72	0.57
	R^2	1.00	1.00	1.00	1.00
	χ^2	0.011	0.008	0.005	0.009
	RMSE	0.03	0.03	0.02	0.02
	EF %	1.00	1.00	1.00	1.00
	P %	1.16	1.05	0.59	0.85

R^2 es el coeficiente de correlación, χ^2 es el valor de chi-cuadrada, RMSE es el error cuadrático medio, EF es la eficiencia del modelo, P% es el error promedio porcentual, k_0 y k_1 son constantes del modelo. W_{eq} y W_{obs-0} son el contenido de equilibrio de humedad predicho y observado, respectivamente.

7.7 Constante de velocidad de hidratación

Cada uno de los modelos produce una constante de velocidad de hidratación que varía significativamente con la temperatura de remojo. Las constantes de velocidad de hidratación del modelo de Primer Orden (tabla 21) y las del modelo

Sigmoide (tabla 22), k_1 y k , respectivamente, mostraron un incremento sistemático con el incremento de la temperatura de remojo. Tal efecto de la temperatura sobre la constante de velocidad de hidratación del modelo de Primer Orden, ha sido reportado en la literatura (Kapsto *et al.*, 2008), señalando que la constante de velocidad de hidratación, k_1 , mostró valores de 0.52 ± 0.03 (10^{-2} min^{-1}) y 9.87 ± 1.08 (10^{-2} min^{-1}) a 45°C . El orden de la magnitud de los valores del modelo de primer orden (k_1) obtenidos en este trabajo para la condición de remojo de 40°C , es superior a los valores reportados por Kapsto *et al.* 2008 en semillas de frijol soya (tabla 21). La constante de velocidad del modelo Sigmoide (k), se encuentra en el mismo orden de magnitud de k_1 , pero su valor es mayor que la constante de velocidad del modelo de Primer Orden (tabla 22). En cualquiera de los casos anteriores, el incremento de la constante de velocidad de hidratación k fue más evidente para las condiciones de deshidratación a 25°C y $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (9.02 veces) y para K_1 el incremento fue mayor en semillas deshidratadas a 25 y 30°C bajo una velocidad del aire de $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (3.77 veces).

Para la constante de velocidad de hidratación del modelo de Peleg, C_1 , se observó un efecto inverso con el incremento de la temperatura de remojo. Esta constante se encuentra relacionada con la velocidad de transferencia de masa y su magnitud es inversamente proporcional a la velocidad inicial de absorción de agua (Gowen *et al.*, 2007b). Esta constante, C_1 , es la inversa de las constantes de velocidad sigmoidea y exponencial, k y k_1 , y se ha demostrado que varía significativamente con la variedad de semilla utilizada, pero no con la temperatura (Kapsto *et al.*, 2008). Por el contrario, Turhan *et al.* (2002) estudió dos variedades de garbanzos sin observar diferencias significativas con la variedad, pero sí con la temperatura de remojo. Este es el caso de las semillas de frijol precocido deshidratado, en el cual se observó un decremento significativo de 4.9 veces de la constante de velocidad de hidratación al incrementar la temperatura de remojo de 40 a 80°C .

7.8 Difusividad efectiva (D_{eff}) y su relación con la energía de activación (E_a)

La variación de la difusividad efectiva en semillas de frijol precocido deshidratado por efecto del incremento de la temperatura de remojo, así como la energía de activación se muestra en la tabla 23.

Tabla 22. Características de absorción de agua de semillas de frijol precocidas deshidratadas siguiendo el modelo Sigmoide.

Temperatura de remojo	Parámetros cinéticos	Condiciones experimentales			
		25°C		30°C	
		0.5 m·s ⁻¹	1.0 m·s ⁻¹	0.5 m·s ⁻¹	1. m·s ⁻¹
40°C	W_{obs-eq} (g g ⁻¹)	1.29	1.24	1.33	1.37
	W_{eq} (g g ⁻¹)	1.25	1.21	1.29	1.32
	k (min ⁻¹)	0.29	0.45	0.28	0.25
	τ (min)	5.68	4.10	5.89	5.96
	R^2	0.96	0.97	0.96	0.95
	χ^2	0.25	0.21	0.26	0.30
	RMSE	0.07	0.06	0.07	0.08
	EF %	0.96	0.97	0.96	0.95
	P %	3.24	2.39	3.20	3.63
60°C	W_{obs-eq} (g g ⁻¹)	1.38	1.31	1.47	1.43
	W_{eq} (g g ⁻¹)	1.33	1.28	1.43	1.39
	k (min ⁻¹)	1.25	2.07	0.66	0.63
	τ (min)	2.54	2.40	3.13	3.17
	R^2	0.97	0.99	0.97	0.97
	χ^2	0.09	0.03	0.21	0.22
	RMSE	0.06	0.04	0.07	0.08
	EF %	0.97	0.99	0.97	0.96
	P %	2.76	1.89	2.31	2.53
80°C	W_{obs-eq} (g g ⁻¹)	1.45	1.41	1.50	1.48
	W_{eq} (g g ⁻¹)	1.41	1.38	1.47	1.43
	k (min ⁻¹)	2.24	4.08	2.23	1.80
	τ (min)	2.54	2.40	3.13	3.17
	R^2	0.99	0.99	0.99	0.98
	χ^2	0.02	0.01	0.16	0.34
	RMSE	0.05	0.04	0.04	0.05
	EF %	0.99	0.99	0.98	0.98
	P %	1.54	1.32	1.06	1.65

R^2 es el coeficiente de correlación, χ^2 es el valor de chi-cuadrada, RMSE es el error cuadrático medio, EF es la eficiencia del modelo, P% es el error promedio porcentual, k y τ son constantes del modelo, W_{eq} y W_{obs-eq} son el contenido de equilibrio de humedad predicho y observado, respectivamente.

En general, el aumento de la temperatura de remojo resultó en un incremento de la difusividad efectiva, D_{eff} , así como del contenido de humedad en equilibrio. El aumento de la temperatura de remojo de 40 a 60°C resultó en un incremento de D_{eff} de 2.4, 2.3, 2.0 y 2.0 veces para los tratamientos T_1 , T_3 , T_4 y T_2 , respectivamente, pero el efecto fue menos evidente en las distintas condiciones experimentales cuando la temperatura de remojo aumentó de 60 a 80°C, obteniendo valores de 1.58 \pm 0.29 veces, donde el mayor incremento fue presentado por el tratamiento T_3 . Las características de rehidratación de un producto deshidratado pueden ser usadas como un índice de calidad. Tales características reflejan los cambios físicos y químicos que se producen durante la deshidratación y esos cambios a su vez, están relacionados con tratamientos previos al cual los productos hayan sido sometidos (Maskan, 2001).

Tabla 23. Coeficiente de difusión (D_{eff}) y energía de activación (E_a) de hidratación.

Condiciones experimentales	Temperatura (°C)	D_{eff} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	W_{eq} ($g \cdot g^{-1}$)	E_a ($Kj \cdot mol^{-1}$)	R^2
T_1 25°C, 0.5 $m \cdot s^{-1}$	40	2.86162E ⁻⁰⁹	1.29		
	60	6.74479E ⁻⁰⁹	1.36	29.97	0.98
	80	1.04677E ⁻⁰⁸	1.43		
T_2 25°C, 1.0 $m \cdot s^{-1}$	40	4.25812E ⁻⁰⁹	1.23		
	60	9.95222E ⁻⁰⁹	1.29	23.56	0.89
	80	1.17382E ⁻⁰⁸	1.39		
T_3 30°C, 0.5 $m \cdot s^{-1}$	40	2.75894E ⁻⁰⁹	1.33		
	60	5.38669E ⁻⁰⁹	1.46	30.48	1.00
	80	1.04053E ⁻⁰⁸	1.48		
T_4 30°C, 1 $m \cdot s^{-1}$	40	2.64187E ⁻⁰⁹	1.36		
	60	5.24655E ⁻⁰⁹	1.42	26.5	0.99
	80	8.34146E ⁻⁰⁹	1.46		

W_{eq} : contenido de humedad en equilibrio para el modelo de Primer Orden.

La cantidad y la tasa de agua absorbida determinan las propiedades sensoriales y el tiempo de preparación requerido por el consumidor. Durante la rehidratación, cambios de volumen en los materiales biológicos son a menudo proporcionales a la cantidad de agua absorbida: el aumento del volumen debido a la absorción de agua es igual al volumen de agua embebida. Algunas investigaciones (Turhan *et al.*, 2002) muestran que la temperatura de rehidratación afecta notablemente el aumento de volumen y contenido de humedad (para el mismo tiempo de proceso) con un aumento de la temperatura, como se observó en el presente estudio para las semillas de frijol precocido deshidratado. Esta tendencia ha sido observada para temperaturas en el intervalo de 40 a 80 °C para gran variedad de frutas y verduras (Krokida y Marinou-Kouris, 2003).

Para ilustrar el efecto de la temperatura de remojo en las tasas de hidratación de frijol precocido deshidratado se aplicó la ecuación de Arrhenius (Ecuación 22). Los valores de $\ln D_{eff}$ fue graficado contra el recíproco de la temperatura absoluta (K) para cada condición de frijol precocido deshidratado sometido a remojo (figura 8). El alto valor de R^2 (0.97 ± 0.05) confirmó que la tasa de absorción de agua de las semillas de frijol precocido deshidratado durante el remojo, fue dependiente de la temperatura, ya que se incrementó el contenido de humedad de saturación con el aumento de la temperatura de remojo de las semillas. La pendiente de la recta resultante se utilizó para calcular la energía de activación (E_a), la cual presentó valores de 29.97, 23.60, 30.48 y 26.50 Kj mol^{-1} para los tratamientos T_1 , T_2 , T_3 y T_4 , respectivamente. Estos valores son similares a los reportados por Abu-Ghannam y McKenna (1997a) en semillas de frijol de la variedad red kidney ($27.15 \text{ Kj mol}^{-1}$), las cuales se escaldaron (100°C por 1.5 minutos) y remojaron en agua a temperaturas de 20 hasta 60°C. Sin embargo, Kapsto *et al.* (2008) evaluaron el efecto del remojo en agua a temperaturas de 25, 35 y 45°C en semillas de frijol variedad ojo negro GC y ojo negro WC, reportando valores de E_a de 37.62 y 78.81 Kj mol^{-1} respectivamente, valores que son superiores a los reportados en esta investigación.

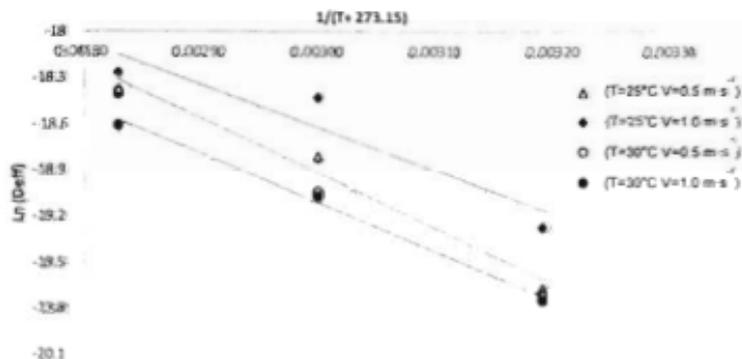


Figura 8. Gráfica de Arrhenius del efecto de la temperatura de remojo sobre la difusividad efectiva de semillas de frijol precocido deshidratado.

VIII. CONCLUSIONES

La deshidratación de semillas de frijol precocido a 25°C y 0.5 m·s⁻¹, mostró baja pérdida estructural (2.90 %), obteniendo un producto final de aceptable calidad.

Las cinéticas de deshidratación fueron descritas adecuadamente por el modelo de Page y se desarrollaron ecuaciones para predecir los coeficientes de k y n, como una función de la temperatura y de la velocidad del aire.

Las semillas de frijol precocido mostraron aumento en parámetros físicos como esfericidad (0.66), diámetro geométrico (0.71 cm), área superficial (1.61 cm²) y volumen (0.13 cm³) después del proceso de deshidratación con respecto a la semilla cruda.

En la caracterización proximal de semillas de frijol precocido deshidratado, se observó una disminución en los contenidos de humedad (11.70 %), grasa cruda (1.74%), proteína cruda (24.13 %) y cenizas (2.22 %) con respecto a la semilla cruda.

El grado de cocción de semillas de frijol precocido deshidratado fue de 98.29%.

La humedad relativa del rehidratado (0.95 ± 0.01) del frijol precocido deshidratado, fue cercano a los valores observados para semillas precocidas sin deshidratar.

Para el proceso de rehidratación, el modelo de Primer Orden presentó contenidos de humedad de saturación estrechamente cercanos a los valores experimentales y la energía de activación calculada fue de 23.60 a 30.48 KJ·mol⁻¹.

IX. LITERATURA CITADA

- Abu-ghannam, N. (1998). Modelling textural changes during the hydration process of red beans. *Journal of Food Engineering*, 38, 341-352.
- Abu-ghannam, N., & Mckenna, B. (1997a). Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Science*, 62(3), 520-523.
- Abu-ghannam, N., & Mckenna, B. (1997b). The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.) *Journal of Food Engineering*, 32, 391-401.
- Adame, C. S. G., & Gutiérrez, B. R. (2001). Análisis de la producción del frijol de la región costera norte de Nayarit para el periodo de 1980 a 1999. Tesis de licenciatura. Licenciatura en Economía. Universidad Autónoma de Nayarit. Pp. 35-37, 59-64, 98-106.
- Afzal, T.M., & Abe, T. (2000). Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. *Computational Electronic and Agricultural*, 26, 137-145.
- Akpınar, E. K., & Bicer, Y. (2005). Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science & Technology*, 40, 273-281.
- Allende, A. G., Acero, G. Ma. G., Padilla, R. J. S., & Mayek, P. N. (2006). Comportamiento agronómico y características físico-químicas del grano de frijol en Aguascalientes, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(1), 89-93.
- Almeida-Costa de, G. E., Queiroz-Mônico, K. da S., Machado-Reis, S. M. P., & Costa-Oliveira de, A. (2006). Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. *Food Chemistry*, 94, 327-330.

Anton, A. A., Ross, K. A., Lukow, O. M., Fulcher, R. G., Arntfield, S. D. (2008). Influence of added bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.) on some physical and nutritional properties of wheat flour tortillas. *Food Chemistry*, 109(1), 33-41.

AOAC (1990). Official Methods of Analysis (15th ed.) Arlington, VI: Association of Official Analytical Chemists.

Arias-Restrepo, J. H., Rengifo-Martinez, T., Jaramillo-Carmona, M. (2007). Buenas prácticas agrícolas (BPA) en la producción del frijol voluble. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Colombia. Disponible en: <http://www.fao.org/manualfrijol.pdf>

Arias-Tapia, S. d. C. (2002). Elaboración de un prototipo de frijol cocido, molido, deshidratado para uso instantáneo. Tesis de Licenciatura. Ingeniería en Agroindustria. Honduras. pp. 3-6.

Ayala, A. V., Schwentesius R. R., Gómez Cruz, M., Almaguer, V. G. (2008). Competitividad del frijol Mexicano frente al de Estados Unidos en un contexto de liberalización comercial. *Región y Sociedad*, 20(42), 37-62.

Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 291-295.

Batista, K. A., H. Prudencio, S., & Fernandez, K. F. (2010). Changes in the functional properties and antinutritional factors of extruded hard-to-cook common beans (*Phaseolus vulgaris*, L.). *Journal of Food Science*, 75(3), 286-290.

Bayram, M., Oner, M. D., & Kaya, A. (2004). Influence of soaking on the dimensions and colour of soybean for bulgur production. *Journal of Food Engineering*, 61, 331-339.

Becker, H. A. (1960). On the absorption of liquid water by the wheat kernel. *Cereal Chemistry*, 37, 309-323.

Bello-Pérez, L. A., & Paredes-López, O. (2009). Starches of some food crops, changes during processing and their nutraceutical potential. *Food Engineering Reviews*, 1(1), 50-65.

Biswas, S. & Kayastha, A. M. (2002). Thermal stability of *Phaseolus vulgaris* Leucoagglutinin: a differential scanning calorimetry study. *Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 35(5), 472-475.

Bonilla-Sánchez, C. R. (2011). Evaluación de las propiedades de rehidratación de cuatro variedades de frijol entero instantáneo. Tesis de licenciatura. Universidad autónoma de Nayarit. Centro de tecnología de alimentos. Pág. 4-42.

Briones-Bermúdez, J. E. (2011). Obtención de harinas de cereales y leguminosas precocidas y su aplicación en alimentos para el adulto mayor. Tesis de Maestría. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. Pp. 26-27.

Brown, T.L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Burdge, J. R. (2004). Química. La ciencia central. México: Pearson. 9ª ed. pp 544-548.

Cai, T. D., & Chang, K. C. (1997). The effect of coatings and processing methods on dehydrated precooked whole pinto beans quality. *Journal of Food Quality*, 20, 315-328.

Camacho-Espinoza, M. K., Peinado-Guevara, L. I., López-Valenzuela, J. A., Valdez-Ortiz, A., Salinas-Pérez R. A., Moreno-Herrera C. G., & Medina-Godoy, S. (2010).

Caracterización proteómica de granos de frijol azufrado (*Phaseolus vulgaris*) cultivados en el estado de Sinaloa. *Ra Ximhai*, 6(1), 23-36.

Carmona-García, R. (2005). Efecto del tipo de remojo en la digestibilidad del almidón en frijol cocido. Tesis de Maestría. Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos. Instituto Politécnico Nacional. Pp 7-19.

Colina-Irezabal, M. L. (2010). Deshidratación de alimentos: conceptos básicos, clasificación de métodos de deshidratación, envasado de productos deshidratados. Editorial Trillas, 9-50.

Corzo, O., Ramírez, O., & Bracho, N. (2008). Aplicación del modelo de Peleg en el estudio de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de láminas de mamey (*Mammea americana* L.). *Saber. Universidad de Oriente*, 20(1), 87-95.

Deak, N. A., & Lawrence A. J. (2007). Fate of phytic acid in producing soy protein ingredients. *Journal American Oil Chemists' Society*, 84, 369-376.

Dolan, K.D., Stoeckle, A.W., & Beck, M.E., (2005). Softening kinetics of cooked dry beans at temperatures below 100°C. *Journal of Texture Studies*, 36, 351-372.

Dorsey, w. R., Strashun, S. I., Roberts, R. L., Johnson, K. R. (1961). New continuous production facility for processing "instant" precooked beans. *Food Technologies*, 15(9), 13-18.

Doymaz, I. (2005) Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*, 69(2), 161-165.

Elizalde, A. de D., Pomilla, Y. P., & Chaparro, D. C. C. (2009). Factores antinutricionales en semillas. *Ciencias Agropecuarias*, 7(1), 45-54.

Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin-layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349-359.

Espinosa-Andrews, H., & Sanchez-Arteaga, H. (2010). Análisis térmico del grado de cocción en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Guanajuato, Gto.

FAOSTAT. Estadísticas de producción, superficie, rendimiento y comercio exterior a nivel mundial. Disponible en: <http://faostat.fao.org>.

Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., González-Laredo, R. F., Ochoa-Martínez, L. A., Corzo, N., Bello-Pérez, L. A., Medina-Torres, L., & Peralta-Álvarez, L. E. (2010). Quality of spaghetti pasta containing Mexican common bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, 119, 1544-1549.

Gepts, P., Beavis, W. D., Brummer, E. C., Shoemaker, R. C., Stalker, H. T., Weeden, N. F., & Young, N. D. (2005). Legumes as a model plant family. Genomics for food and feed report of the cross-legume advances through genomics conference. *Plant Physiology*, 137(4), 1228-1235.

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

Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J. (2007b). Influence of pre-blanching on the water absorption kinetics of soybeans. *Journal of Food Engineering*, 78, 965-971.

Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., Barat, j., Andres, A., Oliveira, J., (2006a). Comparative study of quality changes occurring on dehydration and rehydration of

cooked chickpeas (*Cicer Arietinum* L.) subjected to combined microwave-convective and convective hot air dehydration. *Journal of Food Science*, 71(6), 282-289.

Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., Oliveira, J. (2006b). Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave hot air combination drying. *Trends in Food Science and Technology*, 17, 177-183.

Gowen, A.A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., Oliveira, J. (2008). Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot-air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 129-137.

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

Guzel, 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, 89-95.

Guzmán-Maldonado, S H., Acosta-Gallegos, J. A., Álvarez-Muñoz, A., García-Delgado, S., & Loarca-Piña, G. (2002). Calidad alimentaria y potencial nutraceutico del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultura Técnica en México*, 28(2), 159-173.

Haladjian, N., Fayad, R., Toufeili, i., Shadarevian, S., Sidahmed, M., & Baydoun, E. (2003). pH, temperature and hydration kinetics of faba beans (*Vicia Faba* L.). *Food Processing Preservation*. 27, 9-20.

Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 17, 1167-1172.

Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 6, 169-174.

INEGI (2012). Boletín de información oportuna del sector alimentario. Disponible en <http://www.inegi.org.mx>.

Iniestra-González, J. J., Ibarra-Pérez, F. J., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., & González-Laredo, R. F. (2005). Factores antinutricios y actividad antioxidante en variedades mejoradas de frijol común (*Phaseolus vulgaris*). *Agrociencia*, 39(6), 603-610.

Islam, M.N. & Flink, J.M. (1982). Dehydration of potato: I. Air and solar drying at low air velocities. *Journal of Food Technology*, 17: 373-385.

Jadhav, D. B., Visavale, G. L., Sutar, N., Annapure, U. S., & Thorat, B. N. (2010). Studies on solar cabinet drying of green peas (*Pisum sativum*). *Drying Technology*, 28, 600-607.

Jangam, S. V., Law, C.L., & Mujumdar, A.S. (2010). *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. Vol. 1. (E-book, ISBN 978-981-08-6759-1).

Kapso, K. G., Njintang, Y. N., Kornek, 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, 91-99.

Karathanos, V. T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39, 337-344.

Kassem, A. S. (1998). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In proceedings of the 13th international congress on agricultural engineering, Morocco.

Kavak, A. E. & Bicer, Y. (2005). Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 273-281.

Krokida M.K., & Marinos-Kouris D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products, *Journal Food Engineering*, 57, 1-7.

Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solids materials. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13, 427-432.

Linsberger-Martin, G., Weiglhofer, K., Thi Puong, T. P., & Berghofer E. (2013). High hydrostatic pressure influences antinutritional factors and *in vitro* protein digestibility of split peas and whole white beans. *Food Science and Technology*, 51, 331-336.

Marabi, A., & Saguy, I. S. (2004). Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1105-1110.

Marin, B. E., Lemus, M. R., Flores, M. V., & Vega, G. A. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista chilena de nutrición*, 33(3), 527-538.

Martínez-Meyer, M. R., Rojas, A., Santanen, A., & Stoddard, F. L. (2013). Content of zinc, iron and their absorption inhibitors in Nicaraguan common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, 136, 87-93.

Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177-182.

Maupoey, P. F., Andrés Guas, A. M., Barat Baviera, J. M., Alborn Sorolla, A. M. (2001). Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente. Editorial de la UPV. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. Pp 7-10.

Mederos, Y. (2006) Indicadores de la calidad en el grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Cultivos Tropicales*, 27, 55-62.

Melquiades, Y. I., López, C., Rosas, M. E. (2009). Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus Carota*) deshidratadas. *Información Tecnológica*, 20(3), 65-72.

Mendoza-Rodríguez, O. A. (2003). Refinamiento de un prototipo de frijol cocido, molido y deshidratado para uso instantáneo. Tesis de licenciatura. Ingeniero en agroindustrias. Escuela Agrícola Panamericana, Honduras. pp. 6, 7 y 8.

Methakrup, S., Chiewchan, N., & Devahastin, S. (2005). Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. *LWT - Food Science and Technology*, 38(6), 579-587.

Midilli, A. & Kucuk, H. (2003). Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44, 1111-1122.

Midilli, A., Kucuk, H., & Vapar, Z. A. (2002). New model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503-1513.

Misra, M. K., & Brooker, D. B. (1980). Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 23, 1254-1260.

Mohamed, K. R., Gibriel, A. Y., Rasmy, N. M. H., Abu-Salem, F. M., & Abou-Arab, E. A. (2011). Influence of legume processing treatments individually or in combination on their trypsin inhibitor and total phenolic contents. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5), 1310-1322.

Montes, M. E. J., Torres, G. R., Andrade, P. R. D., Pérez, S. O. A., Marimon, E. J. L., & Meza, H. I. I. (2008). Modelado de la cinética de ñame (*dioscòrea rotundata*) en capa delgada. *Revista ingeniería e investigación*, 28(2), 45-52.

Mubarak, A. E. (2005). Nutritional composition and antinutritional factors of mung bean seeds (*Phaseolus aureus*) as affected by some home traditional processes. *Food Chemistry*, 89(4), 489-495.

Mujumdar, A.S., & Law, C.L. (2010). Drying technology: trends and applications in postharvest processing. *Food and Bioprocess Technology*, 3, 843-852.

Nilgün, E. (2011). The effects of aqueous processing on some physical and nutritional properties of common bean (*Phaseolus Vulgaris* L.). *International Journal of Health & Nutrition*, 2(1), 21-27.

Ondier, G. O., Siebenmorgen, T. J., & Mauromoustakos, A. (2010). Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice. *Journal of Food Engineering*, 100, 545-550.

Oomah, B. D., Tiger, N., Olson, M., & Balasubramanian, P. (2006). Phenolics and antioxidative activities in narrow-leaved lupins (*Lupinus angustifolius* L.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, 91-97.

Overhults, D. D., White, G. M., Hamilton, M. E., & Ross, I. J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 16, 195-200.

Özdemir, M. & Devres, Y.O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233.

Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Indiana: Universidade de Purdue, Dissertação Mestrado.

Pan, Z., & Tangratanaavee, W. (2003). Characteristics of soybeans as affected by soaking conditions. *Lebensmittel-Wissenschaft und-technologie*, 36, 143-151.

Pan, Z., Gregory, A. G., Wei, L., & Haff, R. (2010). Development of impact acoustic detection and density separations methods for production of high quality processed beans. *Journal of Food Engineering*, 97, 292-300.

Panchariya, P.C., Popovic, D., & Sharma, A.L. (2002). Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52, 349-357.

Pardeshi, I. L., Arora, S., & Borker, P. A. (2009). Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. *Drying Technology*, 27, 288-295.

Peleg, M. (1988). An empirical-model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53, 1216-1217, 1219.

Pereira, d S. W., Precker, J. W., & Barbosa, d L. A. G. (2009). Drying kinetics of lima bean (*Phaseolus lunatus* L.) experimental determination and prediction by diffusion models. *International Journal of Food Engineering*, 5(3), 1-19.

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

Rehman, Z. U., Salariya, A.M., & Zafar, S.I. (2001) Effect of processing on available carbohydrate content and starch digestibility of kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, 73, 351-355.

Reyes, R. E., Padilla, B. L. E., Pérez, V. O., López, J. P. (2008). Historia, naturaleza y cualidades alimentarias del frijol. *Revista Investigación Científica*, 4(3), 1-21.

Reynoso-Camacho, R., Ríos-Ugalde, M. d. C., Torres-Pacheco, I., Acosta-Gallegos, J. A., Palomino-Salinas, A. C., Ramos-Gómez, M., González-Jasso, E., & Guzmán-Maldonado, S. H. (2007). El consumo de frijol común (*Phaseolus Vulgaris* L.) y su efecto sobre el cáncer de colon en ratas sprague-dawley. *Agricultura Técnica en México*, 33(1), 43-52.

Ribeiro, N. D., Londero, P. M. G., Cargnelutti F. A., & Jost, E. (2010). Composición de aminoácidos de haba de primera generación obtenidos de cruces con padres con alto contenido de metionina. *Bragantia*, 69(1), 57-61.

Riva, M., & Peri, C. (1986). Kinetics of sun and air-drying of different varieties of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 21, 199-208.

Rocha, R. P. da., Melo, E. de C., Corbín, J. B., Berbert, P. A., Donzeles, S. M. L., & Tabar, J. A. (2012). Cinética del secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(6), 675-683.

Rocha-Guzman, N.E., Gallegos-Infante, J.A., Gonzalez-Laredo, R.F., Bello-Perez, A., Delgado-Licon, E., Ochoa-Martinez, A., & Prado-Ortiz, M.J. (2008). Physical properties of extruded products from three Mexican common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Plant Foods for Human Nutrition*, 63, 99-104.

Rodiño-Minguez, A. P. (2000). Caracterización morfoagronómica y bioquímica de germoplasma de judía común (*Phaseolus vulgaris* L.) de España. Tesis de doctorado. Biología. Universidad de Santiago de Compostela. España. pp 3-5.

Rodriguez, C., & Fernández, R. X. E. (2003). Los frijoles (*Phaseolus vulgaris*): su aporte a la dieta del costarricense. *Acta Médica Costarricense*, 45(3), 120-125.

Sacchetti, G., Pittia, P., Bisenzi, M., Pinnavaia, G. G., & Rosa, M. D. (2003). Kinetic modelling of textural changes in ready-to eat breakfast cereals during soaking in

semi-skimmed milk. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 135-143.

Sacilik, K., & Unal, G. (2005). Dehydration characteristics of kastamonu garlic slices. *Biosystems Engineering*, 92(2), 207-215.

SAGARPA (2008). Sistema Producto Frijol, Plan rector. Disponible en [Http://www.sagarpa.com.mx](http://www.sagarpa.com.mx).

SAGARPA (2011). Panorama Agroalimentario y Pesquero. Nayarit. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx>

SAGARPA. (2004). Plan Rector Sistema Producto Nacional Frijol. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx>.

SAGARPA. (2005). Situación actual y perspectiva de frijol en México. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx>.

Sánchez, R. G., Manriquez, N. J. A., Martínez, M. F. A., & López, I. L. A. (2001). El frijol en México competitividad y oportunidades de desarrollo. FIRA Boletín Informativo, 33(316), 1-89.

Sandoval, S., Rodriguez, J., Méndez, L., Sánchez, J. (2006). Rapidez de secado reducida: Una aplicación al secado convectivo de plátano Roatán. *Revista Mexicana de Ingeniería química*, 5(1), 35-38.

Schwentesiug-Rindermann, R., Ayala-Garay, A. V., & Gómez-Cruz, M. A. (2011). Liberalización comercial del sector agropecuario de México: Competitividad del Frijol. *Revista Globalización, Competitividad y Gobernabilidad*, 5(1), 94-111.

Secretaría de Economía. (2012). Análisis de la Cadena de Valor del Frijol. Dirección General de Industrias Básicas. México. 1-39.

Serrano-Covarrubias, L. M. (2005). Sistema de investigación del cultivo de frijol en México. Problemas económico agroindustriales. México, Universidad Autónoma de Chapingo, 171.

Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, v.5, p.1261-1265.

Sopade, P.A., Xun, Pang Yu., Halley, P.J., Hardin, M. (2007). Equivalence of the Peleg, Pilosof and Singh-Kulshrestha models for water adsorption in food. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 730-734.

Stupski, J. (2012). Effect of freezing and canning on the thiamine and riboflavin content in immature seeds of five cultivars of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *International Journal of Refrigeration*, 35, 890-896.

Su, H. L., & Chang, K. C. (1995) Dehydrated precooked pinto bean quality as affected by cultivar and coating biopolymers. *Journal of Food Science*, 60(6), 1330-1332.

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

Thompson, T. L., Peart, R. M., & Foster, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying – A new model. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 11, 582-586.

Tizazu, H., & Emire, S. A. (2010). Chemical composition, physicochemical and functional properties of lupin (*Lupinus albus*) seeds grown in Ethiopia. *African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development*, 10(8), 3029-3046.

Tovar, J., Fernández, P., M., & Blanco, M. A. (2005). Digestibilidad in vitro del almidón en preparaciones cocidas y molidas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Interciencia*, 30(12), 780-783.

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

Ulloa, J. A., Rosas, U. P., Ramirez, R. J. C., & Ulloa, R. B. E. (2011). El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos. *Revista Fuente*, 8, 5-9.

Ulloa, J.A., Bonilla-Sánchez, C. R., Ortiz-Jimenez, M.A., Rosas-Ulloa, P., Ramirez-Ramirez, J. C., & Ulloa-Rangel, B. E. (2013). Rehydration properties of precooked whole beans (*Phaseolus vulgaris*) dehydrated at room temperature. *CyTA - Journal of Food*, 11(1), 94-99.

Vadivambal, R., & Jayas, D.S. (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products – a review. *Biosystems Engineering*, 98, 1–16.

Vargas-Torres, A., Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., & Bello-Pérez, L. A. (2006). Digestibilidad del almidón en diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Interciencia*, 31(12), 881-884.

Vasconcelos-García, R.A., Nascimento-Rangel, P., Zaczuk-Bassinello, P., Brondani, C., Cunha-Melo, L., Tadeu-Silbov, S., & Vianello-Brondani, R. P. (2012). QTL mapping for the cooking time of common beans. *Euphytica*, 186(3), 779-792.

Vega, A., & Fito, P. (2005). Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annuum* L. cv Lamuyo). *Información Tecnológica*, 16(6), 3-11.

Vega, A., & Lemus, R. (2006). Modelado de la cinética de secado de papaya chitena (*Basconcellea pubescens*). *Información Tecnológica*, 17(3), 23-31.

Vega-Gálvez, A., Scala, K. d., Rodríguez, K., Lemus-Moncada, M. M., López, J., & Pérez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, 117(4), 647-653.

Velásquez P., J. A. & Giraldo, P. A. (2005). Posibilidades competitivas de productos prioritarios de Antioquia frente a los acuerdos de integración y nuevos acuerdos comerciales., Secretaria de Productividad y Competitividad: disponible en: <http://www.antioquia.gov.co>

Voysest, V. O. (2000). Mejoramiento Genético del Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), Centro Americano de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, pág. 4-5.

Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 78, 6505.

Wang, N., Hatcher, D. W., Tyler, R. T., Toews, R., & Gawalko. (2010). Effect of cooking on the composition of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and chickpeas (*Cicer arietinum* L.). *Food Research International*, 43, 589-594.

Yaldiz, O., & Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19, 583-596.

Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.