

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos



*Una Institución Adventista*

**Cinética de hidratación de habas (*Vicia faba L.*) de la variedad gigante de Yunguyo  
y propiedades termodinámicas**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero de Alimentos

Autor

Bach. Séfora Berrío Carbajal

Asesor

Ing. Joel Jerson Coaquira Quispe

**Juliaca, septiembre 2019**

DECLARACION JURADA  
DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Ing. Joel Jerson Coaquira Quispe, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "CINÉTICA DE HIDRATACIÓN DE HABAS (*Vicia Faba L.*) DE LA VARIEDAD GIGANTE DE YUNGUYO Y PROPIEDADES TERMODINAMICAS" constituye la memoria que presenta la bachiller Sefora Berrio Carbajal para aspirar al título Profesional de Ingeniero de Alimentos ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca a los cinco días del mes de febrero del año dos mil veinte



---

Ing. Joel Jerson Coaquira Quispe

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



046

En Puno, Juliaca, Villa Challunquiari, a 02 (día(s) del mes de Septiembre) del año 2019, siendo las 16:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: MSc. Carmen Rosa Apaza Humerec, el secretario: Ing. Enrique Mamani Cuela y los demás miembros: Ing. Alex Danny Chambi Rodriguez y el asesor: Ing. Joel Jerson Coaquira Quispe

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Cinética de hidratación de habas (Vicia faba L.) de la variedad gigante de Yunguyo y propiedades termodinámicas"

de el(los)/a(las) bachiller(es): a) Señora Berrío Carbajal  
 b) \_\_\_\_\_  
 conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero de Alimentos  
(Nomem del Título Profesional)

con mención en \_\_\_\_\_

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)/los candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/a(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Señora Berrío Carbajal

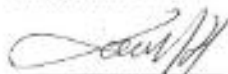
CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy bueno	Sobresaliente

Candidato (b): \_\_\_\_\_

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)/las candidato(s) a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

  
 Presidente

  
 Asesor

  
 Candidato/a (a)

  
 Miembro

  
 Miembro

Candidato/a (b)

## DEDICATORIA

A Dios por su inmenso amor y bendición en estos años, que me guio y me dio fuerzas para caminar aún en medio de los problemas, por ser esa fuerza moral y esa voz constante que hablaba a mi alma para hacer el bien

A mi padre Augusto Berrío Amézquita por su esfuerzo, por su ejemplo, por sus expectativas, por creer en mí, por esa firmeza de carácter y de espíritu, por sus enseñanzas que nunca me han faltado y me han edificado para ser la persona que soy

A mi madre Esther Carbajal Peralta por su tiempo, su dedicación, sus ánimos, su preocupación por mí, su afecto y sus amorosas palabras, también sus consejos y sobre todo ejemplo de constante búsqueda al Señor.

A mi tío Lincoln Berrío Amézquita que en los momentos de más austeridad siempre estuvo dispuesto a apoyarme aun estando lejos.

A dona Silvana y don Valdir quienes fueron parte de una de las experiencias más valiosas de mi vida, por las oportunidades y por su apoyo para culminar mi carrera.

A mi novio Romario por las lecciones aprendidas, por buscar siempre lo mejor de mí, por animarme y por su incondicional afecto.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por bendecirme y guiarme en este tiempo para cumplir mis metas, por permitirme estudiar en su Universidad.

Al Dr. Augusto Pumacahua Ramos por su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo, por permitirme su confianza, por su tiempo y su experiencia profesional y de investigación para culminar la tesis.

Al Ing. Joel Jerson Coaquira Quispe por su asesoría y tiempo para con este trabajo de investigación.

Al Ing. Cesar Augusto Condori Mamani por su ejemplo y sus consejos.

A mis jurados por su paciencia y observaciones que me dieron para culminar este trabajo.

A mis docentes por todo su conocimiento impartido que contribuyeron a mi formación profesional, en especial al Ing. Enrique Mamani Cuela por su apoyo y consejos, a la Ing. Ana Mónica Torres Jiménez que admiro, Al Mg. Daniel Sumire Qquenta por su paciencia y sus conocimientos impartidos, al Ing. Alex Danny Chambi Rodriguez por su amistad y su apoyo.

Gracias de corazón.

## Índice General

RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
CAPÍTULO I .....	16
EL PROBLEMA .....	16
CAPÍTULO II .....	18
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1. Haba ( <i>Vicia faba L.</i> ).....	18
2.1.1. Origen.....	18
2.1.2. Taxonomía y generalidades.....	19
2.1.3. Composición nutricional .....	20
2.1.4. Producción regional de habas.....	22
2.2. Hidratación .....	22
2.2.1. Cinética de hidratación.....	23
2.3. Transferencia de masa .....	23
2.3.1. Estado estacionario.....	24
2.3.2. Estado transitorio.....	24
2.4. Modelos matemáticos.....	26
2.4.1. Modelos empíricos .....	26
2.4.2. Modelos fenomenológicos .....	27
2.5. Propiedades termodinámicas .....	27
2.5.1. Energía de activación .....	27
2.5.2. Entalpía .....	28
2.5.3. Entropía.....	29
2.5.4. Energía Libre de Gibbs .....	29
CAPÍTULO III .....	30
MATERIALES Y MÉTODOS .....	30
3.1. Lugar de investigación .....	30
3.2. Materiales y equipos .....	30
3.2.1. Materia prima .....	30
3.2.2. Materiales .....	30

3.2.3. Materiales de laboratorio.....	31
3.2.4. Equipos .....	31
3.3. Descripción de metodología experimental.....	31
3.3.1. Recepción .....	31
3.3.2. Selección .....	31
3.3.3. Pesado.....	32
3.3.3.1. Caracterización de propiedades físicas de habas .....	32
3.3.3.1.1. Densidad Real.....	32
3.3.3.1.2. Densidad aparente .....	32
3.3.3.1.3. Porosidad aparente .....	32
3.3.3.1.4. Diámetro medio geométrico.....	33
3.3.3.1.5. Esfericidad.....	33
3.3.3.1.6. Unidades por gramo .....	33
3.3.3.2. Determinación de humedad inicial.....	33
3.3.4. Hidratación .....	33
3.3.4.1. Determinación de humedad en equilibrio.....	34
3.3.5. Cinética de hidratación.....	34
3.3.5.1. Modelos fenomenológicos .....	34
3.3.5.1.1. Segunda ley de Fick .....	34
3.3.5.1.2. Parámetros concentrados.....	35
3.3.5.2. Modelos empíricos .....	35
3.3.6. Análisis de ajuste de modelos matemáticos .....	38
3.3.7. Energía de activación .....	38
3.3.8. Propiedades termodinámicas .....	39
3.3.8.1. Entalpía, entropía y energía libre de Gibbs.....	39
CAPÍTULO IV.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	41
4.1. Caracterización física de materia prima .....	41
4.2. Curvas de hidratación.....	42
4.3. Resultados de velocidad de hidratación .....	44
4.4. Modelamiento matemático.....	45
4.4.1. Modelos matemáticos empíricos .....	45
4.4.1.1. Modelo matemático de Peleg .....	45
4.4.1.2. Modelo matemático Page .....	47

4.4.1.3. Modelo matemático Lewis .....	48
4.4.1.4. Modelo matemático Henderson y Pabis .....	50
4.4.1.5. Modelo matemático Logarítmico .....	52
4.4.1.6. Modelo matemático Weibull .....	53
4.4.1.7. Modelo matemático dos Términos .....	55
4.4.1.8. Modelo matemático Aproximación a la Difusión .....	57
4.4.1.9. Modelo matemático Midilli .....	58
4.4.1.10. Modelo matemático Singh y Kulshrestha.....	60
4.4.1.11. Modelo matemático Pilosof et al.....	61
4.4.2. Modelos matemáticos Fenomenológicos .....	63
4.4.2.1. Parámetros concentrados.....	63
4.4.2.2. Segunda ley de Segunda ley de Fick .....	64
4.5. Propiedades termodinámicas .....	66
4.5.1. Resultados de energía de activación.....	66
CAPÍTULO V.....	71
CONCLUSIONES .....	71
Recomendaciones .....	71
Referencias .....	72
ANEXOS .....	79
Anexo 1. Procedimiento para determinación de masa y densidad real.....	79
Anexo 2. Procedimiento de aplicación de Solver en Excel 2010 .....	80



## Índice de Tablas

Tabla 1. Composición nutricional por 100 gramos de porción de habas secas.....	21
Tabla 2. Modelos matemáticos empíricos.....	37
Tabla 3. Propiedades físicas de habas de la variedad gigante de Yunguyo.....	41
Tabla 4. Tiempo de hidratación hasta peso constante por cada temperatura.....	42
Tabla 5. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Peleg.....	45
Tabla 6. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Page.....	47
Tabla 7. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Lewis.....	49
Tabla 8. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Hend y Pabis.....	50
Tabla 9. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Logarítmico.....	52
Tabla 10. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Weibull.....	54
Tabla 11. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático dos Términos.....	55
Tabla 12. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Aprox. Difusión....	57
Tabla 13. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Midilli.....	58
Tabla 14. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Sinhg y Kulhres...60	
Tabla 15. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Pilosof et al.....	62
Tabla 16. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Par. Concentrados..	63
Tabla 17. Constantes y coeficientes estadísticos del modelo matemático Seg. ley de Fick....	64
Tabla 18. Propiedades termodinámicas de habas de la variedad gigante de Yunguyo .....	68

## Índice de Figuras

Figura 1. Habas Gigante de Yunguyo .....	4018
Figura 2. Produccion Regional de Habas .....	22
Figura 3. Metodología Experimental de la Hidratación.....	40
Figura 4. Curvas de hidratación de habas de variedad gigante de Yunguyo.....	43
Figura 5. Curvas de velocidad de hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo...	44
Figura 6. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Peleg.....	46
Figura 7. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Page.....	48
Figura 8. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Lewis.....	50
Figura 9. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Henderson-Pabis.....	51
Figura 10. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de modelo Logarítmico.....	53
Figura 11. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Weibull.....	55
Figura 12. Curvas de hidratación mediante de la ecuación del modelo de dos Términos.....	56
Figura 13. Curvas de hidratación mediante de la ecuación Aproximación a la Difusión.....	58
Figura 14. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Midilli.....	60
Figura 15. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Singh y Kulshretha.....	61
Figura 16. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Pilosof et al.....	62
Figura 17. Curvas de hidratación mediante de la ecuación de Parámetros Concentrados.....	64
Figura 18. Curvas de hidratación mediante de la ecuación del modelo Seg. Ley de Fick.....	65
Figura 19. Gráfico de los coeficientes de difusión vz inverso de la T (°K).....	66
Figura 20. Gráfico de Ln (K) vs inverso de la temperatura (°K).....	67
Figura 21. Relación de la temperatura vs entalpía.....	68
Figura 22 y 23. Relación de la temperatura vs Entropía y Energía Libre de Gibbs.....	69 y 70

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Primera ley de Fick.....	24
Ecuación 2. Acumulación de masa en un cuerpo.....	24
Ecuación 3. Límite de ecuación de acumulación de masa.....	24
Ecuación 4. Segunda ley de Fick.....	25
Ecuación 5. Segunda ley de Fick para placa.....	25
Ecuación 6. Segunda ley de Fick para placa con 1 término de la serie.....	26
Ecuación 7. Balance microscópico de materia.....	27
Ecuación 8. Energía de activación.....	27
Ecuación 9. Energía de activación linelizada.....	28
Ecuación 10. Entalpía.....	28
Ecuación 11. Entalpía de una fase gaseosa.....	28
Ecuación 12. Entalpía de una fase líquida.....	28
Ecuación 13. Entropía.....	29
Ecuación 14. Entropía de fase líquida.....	29
Ecuación 15. Energía libre de Gibss.....	29
Ecuación 16. Energía libre de Gibss para líquidos.....	29
Ecuación 17. Densidad real.....	32
Ecuación 18. Volumen de cilindros.....	32
Ecuación 19. Densidad aparente.....	32
Ecuación 20. Porosidad aparente.....	32
Ecuación 21. Diametro medio geométrico.....	33
Ecuación 22. Esfericidad.....	33
Ecuación 23. Velocidad de hidratación.....	34
Ecuación 24. Segunda ley de Fick.....	35
Ecuación 25. Pendiente de la Segunda ley de Fick.....	35
Ecuación 26. Parámetros concentrados.....	35

Ecuación 27. Modelo de Peleg.....	37
Ecuación 28. Modelo de Page.....	37
Ecuación 29. Modelo de Lewis.....	37
Ecuación 30. Modelo de Henderson y Pabis.....	37
Ecuación 31. Modelo Logarítmico.....	37
Ecuación 32. Modelo de Weibull.....	37
Ecuación 33. Modelo de 2 términos.....	37
Ecuación 34. Modelo de Aproximación a la difusión.....	37
Ecuación 35. Modelo de Midilli.....	37
Ecuación 36. Modelo de Singh y Kulshrestha.....	37
Ecuación 37. Modelo Pilosof et al.....	37
Ecuación 38. Relación adimensional de humedad.....	37
Ecuación 39. Coeficiente de correlación.....	38
Ecuación 40. Error cuadrado medio.....	38
Ecuación 41. Error medio absoluto.....	38
Ecuación 42. Entalpía.....	39
Ecuación 43. Entropía.....	39
Ecuación 44. Energía libre de Gibss.....	39

## Símbolos Usados

$m$	: Masa (g)
$v$	: Volumen ( $m^3$ )
$\rho$	: Densidad ( $kg/m^3$ )
$\varepsilon$	: Porosidad aparente (adimensional)
$dmg$	: Diámetro medio geométrico ( $mm$ )
$\Phi$	: Esfericidad (adimensional)
$MR$	: Relación de humedad (adimensional)
$m_o$	: Humedad inicial
$m_t$	: Humedad en el tiempo
$m_e$	: Humedad en equilibrio
$t$	: Tiempo (h)
$T$	: Temperatura ( $^{\circ}C$ y $^{\circ}K$ )
$e$	: Espesor (cm)
$k_1$	: Constante de transferencia de masa ( $min^{-1}$ ) Peleg
$k_2$	: Constante de capacidad de absorción (adimensional) Peleg
$A, b, g$ y $k$	: Constantes de modelos (adimensionales)
$R^2$	: Coeficiente de determinación
RMSE	: Error cuadrado medio
MAE°	: Media absoluta porcentual
$E_A$	: Energía de activación ( $kJ/mol$ )
$R$	: Constante de gas universal ( $J/mol.K$ )
$D_{ef}$	: Coeficiente de difusión
$D_o$	: Constante de Arrhenius
$\Delta H$	: Entalpía ( $kJ/mol$ )
$\Delta S$	: Entropía ( $kJ/mol.K$ )
$\Delta G$	: Energía libre de Gibbs ( $kJ/mol$ )

## RESUMEN

El presente trabajo estudió la cinética de hidratación de granos de habas de la variedad gigante de Yunguyo en función de la temperatura (20°, 30°, 40° y 50°C) y tiempo (hasta peso constante). El objetivo fue determinar la cinética de hidratación por ganancia de peso, por el conocimiento de la humedad inicial, se determinó la humedad final en cada tiempo. Existe dependencia de la temperatura en el aumento de la humedad de las habas. Los resultados experimentales fueron ajustados a dos modelos fenomenológicos (Fick y Parámetros Concentrados) y once modelos empíricos (Page, Peleg, Lewis, Henderson y Pabis, Logarítmico, Weibull, Dos Términos, aproximación a la Difusión, Midilli, Sinhg & Kulkhesta y Pilosof), se determinó las constantes de los modelos y se validaron mediante regresión no lineal por el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error cuadrado medio ( $RMSE$ ) y la media absoluta porcentual del error ( $MAE\%$ ). El modelo de Weibull presento mejor ajuste con MAE de 4.57 con los datos experimentales de hidratación. Con la ecuación de Arrhenius se determinó la energía de activación que se usó para estimar las propiedades termodinámicas (20.9  $kJ/mol$ ).

**Palabras Clave:** Habas, Segunda Ley de Fick, velocidad de hidratación, modelado matemático, energía de activación, propiedades termodinámicas

## ABSTRACT

The present work studied the kinetics of hydration of beans of the giant variety of Yunguyo as a function of temperature (20°, 30°, 40° and 50° C) and time (up to constant weight). The objective was to determine the hydration kinetics by weight gain, by the knowledge of the initial humidity, the final humidity was determined in each time. There is temperature dependence in the increase of the humidity of the beans. The experimental results were adjusted to two phenomenological models (Fick and Concentrated Parameters) and eleven empirical models (Page, Peleg, Lewis, Henderson and Pabis, Logarithmic, Weibull, Two Terms, Approach to Diffusion, Midilli, Sinhg & Kulkhesta and Pilosof) , the constants of the models were determined and validated by non-linear regression by the coefficient of determination ( $R^2$ ), the mean squared error (RMSE) and the absolute average percentage of the error (MAE%). The Weibull model presented a better fit with MAE of 4.57 with the experimental hydration data. The activation energy that was used to estimate the thermodynamic properties (20.9 kJ / mol) was determined with the Arrhenius equation.

Keywords: Beans, Second Law of Fick, hydration speed, mathematical modeling, activation energy, thermodynamic properties.

## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA

El haba (*Vicia faba L.*) es uno de los granos más cultivados en el Perú y especialmente en la región altiplánica de Puno considerada como uno de los principales productos que es parte de la alimentación de nuestra población. Su valor nutritivo y su disponibilidad la convierten en un grano muy importante en la dieta peruana, se la puede encontrar de forma fresca y de forma seca de acuerdo a la estación. Las habas secas no son muy consumidas debido a la dureza y al proceso de hidratación que necesita, en tal proceso intervienen el tiempo y la temperatura por ello viene a ser en la transferencia de masa una operación unitaria típica de procesos tecnológicos relacionados a los alimentos.

La hidratación de granos constituye una operación importante para la producción de alimentos y separación de componentes. En este tipo de estudios se determinan algunas propiedades relacionadas a la difusión, como el coeficiente efectivo de difusión, la velocidad de difusión, los cambios en las propiedades físicas (densidad, esfericidad, porosidad, etc), así como la energía de activación de la difusión, la entalpía y la entropía diferencial y la energía libre de Gibbs (Ulloa, Ulloa, Ramírez Ramírez, & Ulloa Rangel, 2016).

La determinación de estas propiedades requiere del conocimiento profundo del fenómeno difusivo, las ecuaciones matemáticas fenomenológicas y/o empíricas para modelar el fenómeno, además del conocimiento de las leyes fundamentales de la termodinámica del agua de los alimentos, el cual es nuestro objetivo de estudio.

La ingeniería de Alimentos es una rama de la ciencia que estudia los fenómenos físicos que acontecen durante los procesos de transformación de los alimentos. A través del estudio de la cinética de hidratación se entenderá mejor el proceso de hidratación de las habas, pues esto es una operación muy importante en la industrialización ya que en base al conocimiento de tales propiedades se puede diseñar equipos de hidratación, calcular valores óptimos de hidratación y determinar las condiciones técnicas y económicas (Gumucio del Villar, 2014)



Como punto principal de esta investigación, el conocimiento del proceso de hidratación permitirá una línea de investigación en el modelado matemático y determinación de propiedades termodinámicas.

Como objetivo general del presente trabajo es evaluar la cinética de hidratación de habas (*Vicia Faba* L.) de la variedad Gigante de Yunguyo y determinar las propiedades termodinámicas. Como objetivos específicos:

- Obtener curvas de hidratación de habas (*Vicia Faba* L.) de la variedad Gigante de Yunguyo en cuatro temperaturas (20, 30, 40 y 50°C) hasta el equilibrio.
- Ajustar los datos experimentales a 13 modelos matemáticos para determinar las constantes y el mejor modelo de ajuste.
- Determinar la velocidad de hidratación durante las cuatro temperaturas.
- Determinar propiedades termodinámicas del agua durante la hidratación de habas (*Vicia Faba*) de la variedad Gigante de Yunguyo.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Haba (*Vicia faba L.*)

##### 2.1.1. Origen

El haba (*Vicia faba L.*) de origen asiático. Cultivada mayormente en Afganistán Etiopia y África desde hace cuatro mil años. Fue introducida por los españoles a América y Guatemala y se desarrolló únicamente en países con altiplano y zonas frías como México, República Dominicana, Brasil, Perú, Paraguay, Colombia, y Bolivia. (Aldana de León, 2010).

En Perú en la región del Altiplano Puno las habas es una de las leguminosas más cultivadas, sembrándose más de 8000 ha con rendimiento de 1,25 t/ha de grano seco. El INIA (El Instituto Nacional de Innovación Agraria) ubicado en la estación experimental agraria Illpa – Puno ha desarrollado y liberado el 2009 una variedad denominada INIA 423 – BLANCA GIGANTE DE YUNGUYO, la cual está en estudio en este trabajo de Investigación (INIA, 2013)



Figura 1. Haba Blanca Gigante de Yunguyo (*Vicia Faba L.*)

### 2.1.2. Taxonomía y generalidades

Las especies de las leguminosas pertenecen a la Familia *Fabaceae*, y se diferencian de otras porque sus semillas están contenidas en una vaina (fruto o legumbre). Cuando maduras sus semillas constituyen un alimento con un contenido proteico. Esta familia contiene más de 600 géneros y 13,000 especies, y el ser humano y animales consumen aproximadamente 200 especies (Moreno, 1983; Torija y Diez, 1999). Asimismo se clasifican en dos grupos por su contenido de lípidos: leguminosas oleaginosas como la soja y el cacahuate con alto contenido lipídico (20-50%) y las leguminosas secas o de grano como la judía, el haba, el chícharo, el garbanzo, la lenteja, entre otras con 7% de grasa. (Torija y Diez, 1999)

Bourges (1987) menciona que las leguminosas son del orden Fabales de la clase Magnoliópsidas (Magnoliophyta), tal orden se subdivide en 3 familias: Mimosáceas, Cesalpiniáceas y Fabáceas. Según (Cronquist, 1991)

**Reino:** Plantae

**Sub Reino:** Tracheobionta

**División:** Magnoliophyta

**Sub División:** Angiospermae

**Clase:** Magnoliopsida

**Orden:** Fabales

**Familia:** Fabaceae

**Género:** Vicia

**Especie:** Faba

**Nombre Científico:** *Vicia faba* L.

Existen tres características que diferencian a las legumbres:

- 1) Forman vainas de manera variada y de diversos tamaños, dentro están una o más semillas (Bourges, 1987)
- 2) Pueden asociarse con bacterias *Rhizobium* que forman nódulos en sus raíces. Tales fijan el nitrógeno atmosférico convirtiéndolo en amoníaco disponible para ser

absorbido (500 kg/N/Ha) incluso mayor que lo que logran los abonos costosos (López, 1993).

- 3) Las legumbres pueden sintetizar aminoácidos y acumular grandes cantidades de proteínas sin necesidad de fertilizantes nitrogenados (Bourges, 1987).

### **2.1.3. Composición nutricional**

Los granos o semillas de haba se pueden consumir cuando están frescos o verdes y cuando están secos o deshidratados. En verde pueden consumirse de forma cruda o cocida. En seco, pueden ser consumidos crudos, tostados o como harina en purés o cremas y cuando rehidratadas de forma cocida o fritada. Con todas estas posibilidades, el haba está presente en centenares de comidas, principalmente en sopas, guisos, ensaladas en diversas partes del mundo y tiene un gran potencial en la industria.

El valor nutritivo de las legumbres es esencialmente a su contenido proteico (15-45%), a sus carbohidratos complejos (absorción lenta y no digerible como la fibra). Presentan también un bajo contenido de lípidos, estando constituidos por ácidos grasos polinsaturados (Zulet y Martínez, 2001)

Las habas secas son leguminosas de alto contenido proteico al igual que los garbanzos y las lentejas, superando incluso a la carne (de 19 a 25%) aunque la calidad nutricional de la proteína es inferior ya que no contienen el aminoácido esencial metionina, por esta razón es bueno acompañarlos con cereales o tubérculos (habas con arroz o papa) que contienen tal aminoácido en buena proporción. (Suquilanda, 1984), en la tabla 1 se muestra la composición nutricional de habas secas.

Tabla 1.  
Composición nutricional por 100 gramos de porción de habas secas

Componentes	Unidades	Habas	Habas	Habas gigante de Yunguyo
Energía	Kcal	340.00	350.00	
Agua	g	11.50		10.73
Proteína	g	23.80	24.80	31.69
Grasa	g	1.50	1.40	1.39
Carbohidratos Totales	g	60.10	60.40	52.39
Fibra Cruda	g	6.40	7.00	1.33
Cenizas	g	3.10	3.30	2.46
Calcio	mg	97.00	97.80	
Fosforo	mg	413.00	373.30	
Hierro	mg	2.00	6.66	
Tiamina	mg	0.39	0.90	
Riboflavina	mg	0.30	0.183	
Niacina	mg	4.00	15.44	
Ácido Ascórbico	mg	8.60	4.00	

Fuente: (Reyes et al. 2009) (Augustin & Klein, 1989) (Ccopa, 2015)

El contenido de minerales de las leguminosas es del 2.5 – 4.2%. El contenido mayoritario es el potasio (586 – 1830 mg/100g), fósforo (250 – 657 mg/100g) y el hierro en (2,2 – 12.5 mg/100g) comparado con el aportado de una carne magra (3 mg/100g) y las leguminosas (7.0 mg/100g). (Kadam *et al.*, 1989; Torija y Díez, 1999).

### 2.1.4. Producción regional de habas

Existen 37 organizaciones asociadas en las Mesa de Trabajo de la Cadena Productiva de Habas de Yunguyo en la región de Puno y actualmente exportan a países como Argentina y Ecuador. Teniendo una alta demanda en el mercado interno, así como en el extranjero gracias a su certificación orgánica. Según el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) la producción anual de habas en Yunguyo, es de 40 a 50 TM en el 2018. En la figura 2 se muestra la distribución de las áreas sembradas de haba en la región en el 2006.

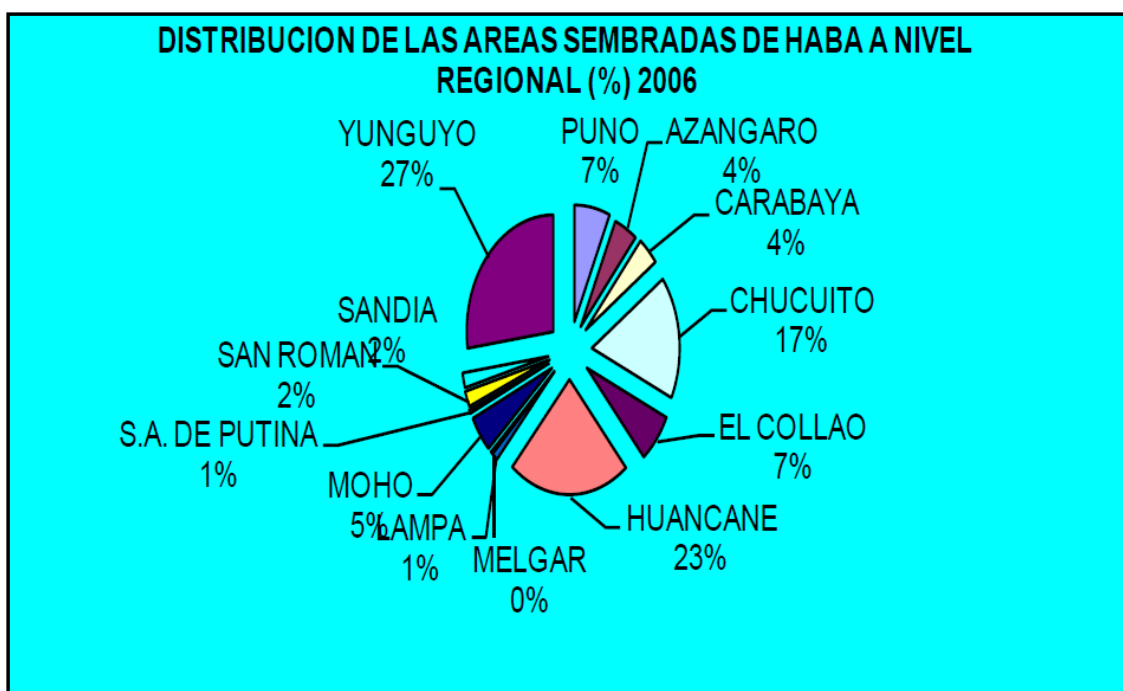


Figura 2. Distribución de las Áreas Sembradas de Habas a Nivel Regional (ADRA PUNO, 2006)

### 2.2. Hidratación

La hidratación es un mecanismo de difusión de masa (osmosis), que busca la ganancia de humedad o agua en un producto, para que este pueda volver a tener características sensoriales y organolépticas aptas para el consumo. La hidratación como operación unitaria permite que los granos secos estén disponibles para operaciones posteriores como molienda., cocción, fritura, etc.

### **2.2.1. Cinética de hidratación**

Conocida como energía del movimiento, la cinética estudia las leyes del movimiento de los cuerpos que dependen de la masa y velocidad. La cinética de hidratación estudia la transferencia de masa de agua en el alimento. El estudio de la cinética de hidratación es muy útil para optimizar esta operación unitaria. Desde el punto de vista del proceso, es interesante no sólo conocer lo rápido que puede absorberse el agua, sino también conocer cómo afecta a la velocidad de hidratación, las variables de proceso y como predecir el tiempo de hidratación bajo determinadas condiciones.

Desde el punto de vista de la Ingeniería de alimentos, la hidratación (así como el secado) es un proceso de transferencia de masa. Como tal, se estudia la cinética de transferencia de masa mediante modelos matemáticos empíricos y fenomenológicos. Para los modelos empíricos existen diversos modelos y para los fenomenológicos se utiliza la segunda ley de Fick. Por lo general se hidrata en diferentes temperaturas, pues permite determinar propiedades físicas y termodinámicas del agua en el proceso de hidratación. Las propiedades que se determinan son: la energía de activación, la entalpía y entropía diferencial y la energía libre de Gibbs (Corrëa et al., 2010; Jideani & Mpotokwana, 2009; Rocha et al., 2012).

### **2.3. Transferencia de masa**

La transferencia de masa es la ciencia que estudia cómo se transfiere la masa de un lugar a otro. Los fenómenos de transporte (calor, momento y masa) están basados en un gradiente que es la causa del transporte y pueden acontecer juntos estos tres fenómenos pero siempre uno de ellos prevalece. Cuando el gradiente es cero, ya no existirá transferencia, estableciéndose el nuevo estado de equilibrio (Cremasco, 1998).

El estudio de la absorción de solutos a un sólido se efectúa a través de diversos métodos siendo dos de ellos, los modelos fenomenológicos (Segunda ley de Fick, Parámetros Concentrados) y los modelos empíricos (Page, Peleg, Lewis, Henderson y Pabis, Logarítmico, Weibull, Dos Términos, Aproximado a la Difusión, Midilli, Pilosof y Singh & Kulshrestha) los cuales predicen los datos experimentales de hidratación.

### 2.3.1. Estado estacionario

Se dice estado estacionario cuando la variable tiempo no está presente, ósea se encuentra en un régimen permanente dependiente solo de la distancia, así la ecuación básica es análoga a las Leyes de Fourier y Newton que se puede expresar en unidades másicas y molares (Pumacahua, 2011). La Ecuación 1 muestra la transferencia de masa en estado estacionario.

$$J_1 = -D \frac{dC}{dz} \quad (1)$$

Dónde

:

$J_1$  = flujo difusivo, ( $Kg/m^2 s$ )

$D$  = Coeficiente de difusión, ( $m^2/s$ )

$dC$  = Diferencial de concentración, ( $Kg/m^3$ )

$dz$  = distancia a recorrer ( $m$ )

### 2.3.2. Estado transitorio

Cuando el factor tiempo es considerado, se inicia con un balance de velocidad de transferencia de masa en un volumen de control.

(Acumulación de masa en un volumen,  $A\Delta z$  = Velocidad de difusión para dentro de VC -  
Velocidad de difusión para fuera del VC)

$$\frac{d[(A\Delta z)c_1]}{dt} = (AJ_1)_z - (AJ_1)_{z+\Delta z} \quad (2)$$

Dividiéndose esta ecuación por  $\Delta z$ , y calculando el límite cuando  $z$  tiende a cero, se tiene:

$$\frac{d(Ac_1)}{dt} = - \frac{d(AJ_1)}{dz} \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (1) del flujo difusivo o primera ley de Fick, en la (3), área constante, estado transitorio, se tiene la denominada segunda ley de Fick:



$$\frac{dc_1}{dt} = D_{ef} \frac{d^2c_1}{dx^2} \quad (4)$$

Aquí aparece el coeficiente efectivo, que considera la difusión del soluto bajo varios factores juntos. Consideramos que la concentración,  $c$ , es másica y corresponde a la humedad del sólido ( $X$ ). Esta ecuación es resuelta por el método de separación de variables para el modelo placa, con las siguientes condiciones de frontera:

Condición inicial.  $t=0, X = X_0$

Condición de frontera 1.  $t > 0, X = X_t$

Condición de frontera 2.  $t > 0, X = X_\infty$

Con estas condiciones de frontera, la solución a la Ecuación (4) (Crank, 1975)(Cremasco, 1998) es:

$$\frac{X_t - X_\infty}{X_0 - X_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp}\left(-\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 \frac{D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (5)$$

Donde,  $X_t$  es la humedad durante el tiempo de hidratación,  $X_0$  es la humedad inicial,  $X_\infty$  es la humedad de equilibrio,  $D_{ef}$  es la difusividad efectiva ( $m^2/s$ ),  $t$  es el tiempo ( $s$ ),  $L$  es la longitud característica o la mitad del espesor ( $m$ ) y  $n$  es el número de serie.

En el modelo difusivo o segunda ley de Fick en estado transitorio, la difusión se inicia debido al gradiente de concentración entre la solución y los granos de habas en función de la longitud y del tiempo, hasta alcanzar el estado de equilibrio.

Las siguientes hipótesis fueron consideradas para la utilización de la ecuación (5). En el tiempo cero, la superficie del grano está en equilibrio con el ambiente. La composición de granos es homogénea con relación a la difusividad. El grano de habas entra en equilibrio hasta el final de la hidratación. Las propiedades del agua son constantes durante el proceso de hidratación. El proceso de difusión envuelve apenas la transferencia de agua para los granos, y nada de los granos para la solución. El proceso es isotérmico. Los solutos difunden solamente en la dirección radial. El efecto del aumento de volumen no es considerado, pero se usa una longitud media. Los granos de habas tienen la misma característica en todos los tratamientos.

La constante  $D_{ef}$  fue determinada utilizando el programa Microsoft Excel y la herramienta Solver al determinar las humedades calculadas por el este modelo en las 4

temperaturas. Se usaron 6 términos de la serie de la Ecuación (6) para todas las temperaturas

$$X_t = X_\infty + (X_0 - X_\infty) \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp}\left(-\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 \frac{D_{ef}}{L^2} t\right) \quad (6)$$

## 2.4. Modelos matemáticos

Para la optimización del proceso de hidratación por razones de calidad del producto y costos es necesario simular la velocidad de hidratación con la ayuda de los modelos matemáticos, los cuales representan fenómenos cinéticos como la transferencia de masa. Se clasifican en dos grupos: empíricos y fenomenológicos.

Se han usado ampliamente éstos modelos para simular la cinética de hidratación: Peleg y Parámetros Concentrados en soja (Fracasso et al., 2014), Henderson & Pabis, Page, Exponencial de dos Términos y Peleg en lentejas rojas (Kumar et al., 2018), Peleg, Weibull, Exponencial, y la segunda Ley de Fick para garbanzo (Prasad, K., Vairagar, P.R., Bera, M.B., 2010), Segunda ley de Fick, Lewis, Page, Page Modificado, Henderson y Pabis y Dos Términos en arroz integral (Cheevitsopon, E, & Noomhorm, T., 2010).

### 2.4.1. Modelos empíricos

Los modelos empíricos no se basan en procesos físicos tales como el espesor, sino que son obtenidos a partir de simples correlaciones matemáticas de los datos experimentales (Singh y Kulshrestha, 1987).

Se vienen desarrollando muchos modelos empíricos con la finalidad de explicar la transferencia del agua en sólidos higroscópicos como son los alimentos (Sharaf-Eldeen et al., 1979). Tales modelos consideran el contenido de humedad uniforme, el comportamiento de las piezas isotrópico y la resistencia interna predominante al transporte de agua (Keqing, 2004).

Lewis (1921) nos dice que la forma general de estas relaciones empíricas representa matemáticamente una relación de proporcionalidad directa entre la velocidad de

hidratación y la diferencia de humedad entre el material que se está hidratando y la del mismo en condiciones de equilibrio.

#### 2.4.2. Modelos fenomenológicos

Kenig (2004) menciona que estos modelos están basados en mecanismo difusional, donde se emplea la fuerza impulsora al gradiente de humedades de modo que la ecuación del balance microscópico de materia es común a todos ellos. Tal ecuación es (7)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_{ef} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Estos modelos se apoyan en una serie de suposiciones que simplifican la complejidad matemática de las ecuaciones diferenciales planteadas, tales son: Homogeneidad y Geometría de las piezas, Contracción e Influencia de la temperatura en los diferentes modelos (Kenig, 2004).

#### 2.5. Propiedades termodinámicas

Las propiedades termodinámicas cuantifican el estado de energía y de agregación de sustancias de un elemento a otro. A continuación, definimos tales propiedades de estado.

##### 2.5.1. Energía de activación

La influencia de la temperatura sobre la difusividad se expresa usando la expresión de Arrhenius estando dicha influencia caracterizada por una energía de Activación ( $E_a$ ) propia de cada producto (Mulet et al., 1989; Waananen et al., 1993). La energía de activación es la cantidad de energía requerida para que las moléculas se reorganicen y acontezca el proceso (Koretsky, 2007).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

Donde  $D_{eff}$  y  $D_0$  tienen unidades de  $m^2/s$ ,  $E_a$  de  $kJ/mol$ ,  $R$  es la constante de los gases ( $8.314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/mol K}$ ) y  $T$  la temperatura ( $^{\circ}K$ ). Linealizando la ecuación (8) se obtiene:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (9)$$

Plotando el  $\ln D_{eff}$  contra el inverso de la temperatura absoluta ( $1/K$ ) y ajustando a una ecuación lineal se obtiene la pendiente de la recta ( $E_a/R$ ). Esta se multiplica por la constante general de los gases ( $R$ ) obteniéndose la energía de activación ( $E_a$ ) (Pumacahua, 2011). A través de la constante hallada del mejor modelo matemático de ajuste en la hidratación se puede obtener la  $E_a$  es la energía de activación necesaria, para que las moléculas de agua se difundan en los granos de habas.

### 2.5.2. Entalpía

La entalpía es una función de estado que nos permite calcular directamente la transferencia de calor en un sistema (Muller, 2002), es la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con el entorno y se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$H(T)^{ideal} = \int_{T_0}^T C_{p_i}(T) dT \quad (10)$$

Para calcular esta propiedad, pero de una fase líquida, se realiza una corrección de la entalpía en fase gaseosa mediante el calor de vaporización y de la temperatura crítica.

$$H(T)^{ideal} = \sum_{i=1}^n x_i \int_{T_0=0^{\circ}K}^T C_{p_1}(T) dT - HV_i \left[ \frac{(T - T_{Ci})}{T_{Bi} - T_{Ci}} \right] \quad (11)$$

Dónde:

$HV_i$  = es el calor latente de vaporización

$T_C$  = Temperatura Crítica

$T_B$  = Temperatura Normal de Ebullición

Aplicando tal corrección tendríamos:

$$\Delta H_L = H_L^{real} - H_L^{ideal} \quad (12)$$

### 2.5.3. Entropía

La entropía describe lo irreversible o el grado de desorden que poseen las moléculas que integran los sistemas termodinámicos (Conde Abad, 2007).

$$S(T)^{ideal} = \int_{T_0}^T C p_i \frac{(T)}{T} dT \quad (13)$$

Para calcular el valor de la entropía en la fase líquida tenemos la siguiente ecuación:

$$S(T)_{Li}^{ideal} = \sum_{i=1}^n x_i \int_{T_0=1^{\circ}K}^T C p_i \frac{(T)}{T} dT - \frac{h_{Vi}}{T} \left[ \frac{(T - T_{Ci})}{T_{Bi} - T_{Ci}} \right]^{0.38}$$

$$S(T)_{Li}^{ideal} = \sum_{i=1}^n S_{Li}^{ideal} x_i + R \sum_{i=1}^n x_i \ln(x_i)$$

$$\Delta S_L = S_L^{real} - S_L^{ideal} \quad (14)$$

### 2.5.4. Energía Libre de Gibbs

La energía libre de Gibbs es un potencial termodinámico, una función de estado extensiva con unidades de energía que representa la condición de equilibrio y la espontaneidad de una reacción química (con presión y temperatura constantes) fórmula 15. La energía libre de Gibbs es la fuerza que impulsa para que la hidratación ocurra a una temperatura y presión constantes

$$AG = \Delta H - T\Delta S \quad (15)$$

Y para líquidos:

$$G_L^{ideal} = H_L - S_L T$$

$$\Delta G_L = G_L^{real} - G_L^{ideal} \quad (16)$$

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de investigación

El trabajo de investigación fue realizado en el Centro de Investigación y Tecnología de Alimentos (CITAL) de la Escuela Profesional de Alimentos de la Universidad Peruana Unión filial Juliaca, situada en la carretera a Arequipa km 6 – Juliaca.

- Lugar : Chullunquiani
- Provincia : Juliaca
- Departamento : Puno
- Temperatura : 18°C
- Altitud : 3888 m.s.n.m.
- Humedad Relativa : 13 – 40%

#### 3.2. Materiales y equipos

##### 3.2.1. Materia prima

Las habas para el estudio fueron de la variedad Blanca Gigante de Yunguyo, proveniente de la provincia de Yunguyo departamento de Puno.

En el laboratorio fueron separados los granos agrietados y de menos peso. Tal proceso de selección está descrito en el Anexo 1. Después de la limpieza los granos fueron colocados en un saco plástico de 5 Kg y almacenado en ambiente seco.

##### 3.2.2. Materiales

- Papel absorbente
- Contenedor de 200ml
- Bolsas de Nylon pequeñas
- Bandejas de Aluminio
- Agua Potable
- Cuaderno de apuntes

- Bolígrafo

### **3.2.3. Materiales de laboratorio**

- Probeta de 500 ml marca Pírex
- Placas Petri marca Pírex
- Vaso precipitado de 100 ml marca Pírex
- Pinzas
- Mortero y pilón de porcelana

### **3.2.4. Equipos**

- Balanza Digital Electrónica marca OHAUS Cap. 210g (precisión 0,0001)
- Baño María con agitador BS-11 temperatura  $\pm 5^{\circ}\text{C}$
- Bernier digital marca STANLEY
- Estufa KERT LAB 0,046-9030B
- Cronometro

## **3.3. Descripción de metodología experimental**

### **3.3.1. Recepción**

En esta etapa se recepcionó los granos de haba de la variedad Gigante de Yunguyo

### **3.3.2. Selección**

El proceso de selección fue realizó mediante las siguientes etapas:

Selección manual: En los granos seleccionados hay granos de color marrón y negros provenientes de otras variedades. Para eliminarlos se procede a separar manualmente esos granos de habas con los dedos. Al realizar la selección manual se separan algunos restos que cayeron durante su cosecha y granos agrietados. Luego seleccionamos los granos por su peso para homogenizar (pesos aproximados) las muestras.

Almacenado: Los granos seleccionados se almacenan en bolsas de polietileno hasta el momento del pesado para el proceso de hidratación.

### 3.3.3. Pesado

Se pesaron aproximadamente de 20 a 21 gramos que comprenden 6 habas pre seleccionadas, sin granos defectuosos. Asimismo se realizó la caracterización física del grano de habas.

#### 3.3.3.1. Caracterización de propiedades físicas de habas

##### 3.3.3.1.1. Densidad Real

El método utilizado es el de desplazamiento de líquido. Se utilizó una muestra de 40 g de habas y se colocó en una probeta graduada de 200 ml. Se mide el incremento de altura el volumen de la masa de las habas. La fórmula siguiente fue utilizada:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Kg/m}^3) \quad (17)$$

##### 3.3.3.1.2. Densidad aparente

Se determinó mediante la masa real y el volumen aparente de las habas en un vaso precipitado de volumen conocido, mediante:

$$V_{cil} = \frac{\pi D^2}{4} * L \quad (18)$$

$$\rho_A = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen Cilindro}} \quad (19)$$

##### 3.3.3.1.3. Porosidad aparente

Se determinó mediante la relación de las densidades real y aparente:

$$\varepsilon = (1 - \rho_A/\rho_R) * 100 \quad (20)$$



#### **3.3.3.1.4. Diámetro medio geométrico**

Se determinó el Diámetro Medio Geométrico con un Bernier digital, se mide los diámetros (largo, corto y ancho) con cinco repeticiones, y se usa la siguiente fórmula:

$$dmg = (a * b * c)^{1/3} \quad (21)$$

Dónde: a es el diámetro mayor (largo), b es el diámetro medio (corto) y c es el diámetro pequeño (ancho)

#### **3.3.3.1.5. Esfericidad**

En base a los datos ya obtenidos del diámetro medio geométrico con la Ecuación (22) se halló la esfericidad.

$$\emptyset = dmg/a \quad (22)$$

#### **3.3.3.1.6. Unidades por gramo**

Es interesante conocer cuántas unidades de habas corresponden a un gramo de masa. Se procedió a pesar 40 g de habas y a contar los granos manualmente. Se hicieron tres repeticiones para cada determinación. Se expresa este valor en granos/g de habas.

#### **3.3.3.2. Determinación de humedad inicial**

La humedad inicial fue determinada por el método oficial (AACC-American Association of Cereal Chemistry, 2000) a 105<sup>0</sup>C/24h, utilizando 5g de muestra aproximado en tres repeticiones y pesados en balanza digital electrónica de tres dígitos de precisión (0,0001g).

#### **3.3.4. Hidratación**

Las muestras de habas se colocan en bolsas pequeñas de Nylon cada una conteniendo seis habas con un peso aproximado de 20 – 21 g aproximadamente por triplicado. Se

realiza la hidratación a cuatro temperaturas distintas 20, 30, 40, y 50°C; hasta llegar a peso constante, las tres primeras horas se pesa a cada media hora y luego cada una hora usando papel absorbente para retirar la humedad superficial, tales pesadas se realizan por el método gravimétrico para determinar la ganancia de humedad

#### **3.3.4.1. Determinación de humedad en equilibrio**

El dato de la humedad en equilibrio se obtuvo experimentalmente hidratando las muestras en el baño maría hasta que ya no se produjeran cambios en el peso durante cuatro mediciones de peso sucesivas (Siqueira et al., 2012)

#### **3.3.5. Cinética de hidratación**

Se modeló trece modelos matemáticos (11 empíricos y 2 fenomenológicos) para explicar los datos de absorción de agua por los granos de habas. Los resultados fueron ajustadas con la herramienta Solver<sup>®</sup> del programa Microsoft Excel Windows<sup>®</sup> (2010) (Anexo 1)

Mediante la Ecuación (23) se determinó la velocidad de hidratación para cada temperatura de hidratación:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{(X_f - X_i)}{(t_f - t_i)} \quad (23)$$

Dónde:  $x_f$  es la humedad después de un intervalo de 30 min de hidratación,  $x_i$  es la humedad al inicio de un intervalo de 30 y 60 min,  $t_f$  y  $t_i$  son los tiempos correspondientes.

##### **3.3.5.1. Modelos fenomenológicos**

###### **3.3.5.1.1. Segunda ley de Fick**

La humedad experimental de los granos de habas fue modelada por la ecuación (5). Para esto es necesario el conocimiento del  $D_{ef}$ . Como la ecuación (5) es una solución en serie

con  $n = 1 \dots \infty$ , el  $D_{ef}$  fue determinado mediante la ecuación 24 con seis términos ( $n = 6$ ) linealizando:

$$\ln\left(\frac{X_t - X_\infty}{X_0 - X_\infty}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2 n^2}\right) - \frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{r^2} \quad (24)$$

En la ecuación (24) la pendiente es,

$$p = \frac{n^2 \pi^2 D_{ef}}{r^2} \quad (25)$$

Se grafica  $\ln\left(\frac{X_t - X_\infty}{X_0 - X_\infty}\right)$  vs  $t$ , y se determina el  $D_{ef}$ . Este valor de  $D_{ef}$  fue optimizado mediante la herramienta Solver<sup>®</sup> (Excel 2010) para varios términos hasta tener un error mínimo.

### 3.3.5.1.2. Parámetros concentrados

Iniciando de un balance de masa para el agua contenida en las habas y suponiendo que la concentración de agua en el grano es uniforme en cada tiempo tenemos la ecuación (26) para una placa:

$$MR = \exp\left(\frac{-3k}{e} * t\right) \quad (26)$$

Dónde:

$MR$ : Relación de Humedad (ecuación 28)

$k$ : Constante de transferencia de masa aparente ( $\text{ms}^{-1}$ )

$e$ : espesor ( $\text{mm}$ )

$t$ : tiempo ( $s$ )

### 3.3.5.2. Modelos empíricos

Los modelos empíricos generalmente son más simples y de fácil aplicación ajustando bien a los datos experimentales, dentro de los cuales los más usados en la hidratación de granos son Peleg, Henderson y Pabis, dos Términos, Weibull y Page. Y los

modelos no muy difundidos son Lewis, aproximación a la Difusión, Midilli, Singh & Kulshrestha y Pilosof et al.

En la tabla 2 se muestran las ecuaciones de los modelos empíricos usados en la hidratación de habas.

Tabla 2.

*Modelos matemáticos empíricos*

<b>Nombre del Modelo</b>	<b>Fórmula matemática</b>	<b>Referencia</b>
Peleg	$MR = \left( \frac{t}{k_1 + k_2 t} \right)$	(27) (Fracasso et al., 2014)
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^N)$	(28) (Kumar et al., 2018)
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	(29) (Cheevitsopon, E, & Noomhorm, T., 2010).
Henderson & Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	(30) (Kumar et al., 2018)
Logarítmico	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b$	(31) (Kaur & Singh, 2014)
Weibull	$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{k}\right)^2\right)$	(32) (Prasad, K., Vairagar, P.R., Bera, M.B., 2010),
2 Terminos	$MR = a \cdot \exp(-k_1 t) + b \cdot \exp(-k_2 t)$	(33) (Cheevitsopon, E, & Noomhorm, T., 2010).
Aproximación a la Difusión	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(34) (Yaldyz & Ertekyn, 2001)
Midilli	$MR = a \cdot \exp(-kt^N) + bt$	(35) Balbay, Avci, Sahin, & Coteli, 2012)
Sing & Kulshrestha	$MR = \left( \frac{1}{kt + t} \right)$	(36) Sopade, P. A., Xun, P. Y., Halley, P. J., & Hardin, M. (2007)
Pilosof et al	$MR = \frac{k_1 \cdot t}{k_2 + t}$	(37) Sopade, P. A., Xun, P. Y., Halley, P. J., & Hardin, M. (2007)

Donde a, b, g y k son constantes de los modelos y son adimensionales, t es el tiempo de hidratación y MR según la ecuación (38) es la relación adimensional de humedad.

$$MR = \frac{Mt - Me}{Mo - Me} \tag{38}$$

Donde  $M_t$  es el contenido de humedad en remojo,  $M_o$  es el contenido de humedad inicial y  $M_e$  el contenido de humedad en equilibrio o humedad saturada (que se relaciona a la absorción máxima de agua).

### 3.3.6. Análisis de ajuste de modelos matemáticos

Para evaluar la calidad de aproximación de los modelos a los datos experimentales se determinaron por el coeficiente de correlación, el error medio cuadrático (RMSE) y el error medio absoluto (MAE%).

$$R^2 = 1 - \left( \frac{n \sum_{i=1}^N ((X_{ex} - X_{aj})^2)}{n \sum_{i=1}^N X_{ex}^2 - (\sum_{i=1}^N X_{ex})^2} \right) \quad (39)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ex} - X_{aj})^2}{n}} \quad (40)$$

Donde  $X_{ex}$  son los valores experimentales,  $X_{aj}$  son los valores ajustados, y  $n$  el número de datos observados. Según (Brousse et al, 2012) menciona que para tener un buen ajuste el  $R^2 > 0.85$  cercano a 1 y el RMSE tener números pequeños cercanos a 0, ya que números grandes significan errores de pronóstico. Y la raíz del error cuadrado (MAE%).

$$MAE\% = \frac{100}{N} \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{X_e - X_c}{X_e} \right| \quad (41)$$

Siendo  $N$  el número de determinaciones y  $x_c$  la humedad calculada por el modelo.

Según (Vidal, Maupoey, & Tarraza, 1986) los valores inferiores al 10% en la raíz del error cuadrado medio MAE muestra un buen ajuste del modelo matemático.

### 3.3.7. Energía de activación

Se obtuvo la energía de activación con los datos de las constantes  $K_1$  y  $D_{ef}$  del modelo con mejor ajuste a través de la Ecuación de Arrhenius linealizada, Ecuación (9)

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_o) - \frac{Ea}{RT}$$

Donde  $Def$  es la constante del modelo sensible a la temperatura,  $Do$  constante de Arrhenius,  $Ea$  energía de Activación ( $KJ/mol$ ),  $R$  constante de gas universal ( $8.314 J/mol.K$ ) y  $T$  es la temperatura ( $^{\circ}K$ ).

### 3.3.8. Propiedades termodinámicas

#### 3.3.8.1. Entalpía, entropía y energía libre de Gibbs

A partir de la Energía de Activación ( $E_a$ ) es posible determinar las propiedades termodinámicas Entalpía ( $\Delta H$ ), Entropía ( $\Delta S$ ) y Energía Libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) (Jideani y Mpotokwana, 2009). Con estas propiedades es posible establecer el nivel de afinidad entre el agua y los alimentos, las fuerzas de unión intermoleculares, la disposición espacial y el proceso de absorción espontánea (Montanuci, Jorge, & Jorge, 2013) (Oulahna, Hebrard, Cuq, Abecasiss, & Fages, 2012).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (42)$$

$$\Delta S = R \left\{ \ln k_0 - \ln \left( \frac{k_b}{h_p} \right) - \ln T \right\} \quad (43)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (44)$$

Donde  $R$  es la constante de gas universal ( $8.314 J/mol.K$ ),  $k_o$  y  $E_a$  se obtienen del ajuste de la ecuación de Arrhenius con los valores de la constante  $k_1$  a diferentes temperaturas,  $k_b$  es la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-3} J/K$ ),  $k_p$  es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{Julios}$ ) y  $T$  es la temperatura ( $^{\circ}K$ ).

En la Figura (3) se muestra el diagrama de flujo que explica los procesos y metodología experimental del presente trabajo de investigación:

### HABAS GIGANTE DE YUNGUYO

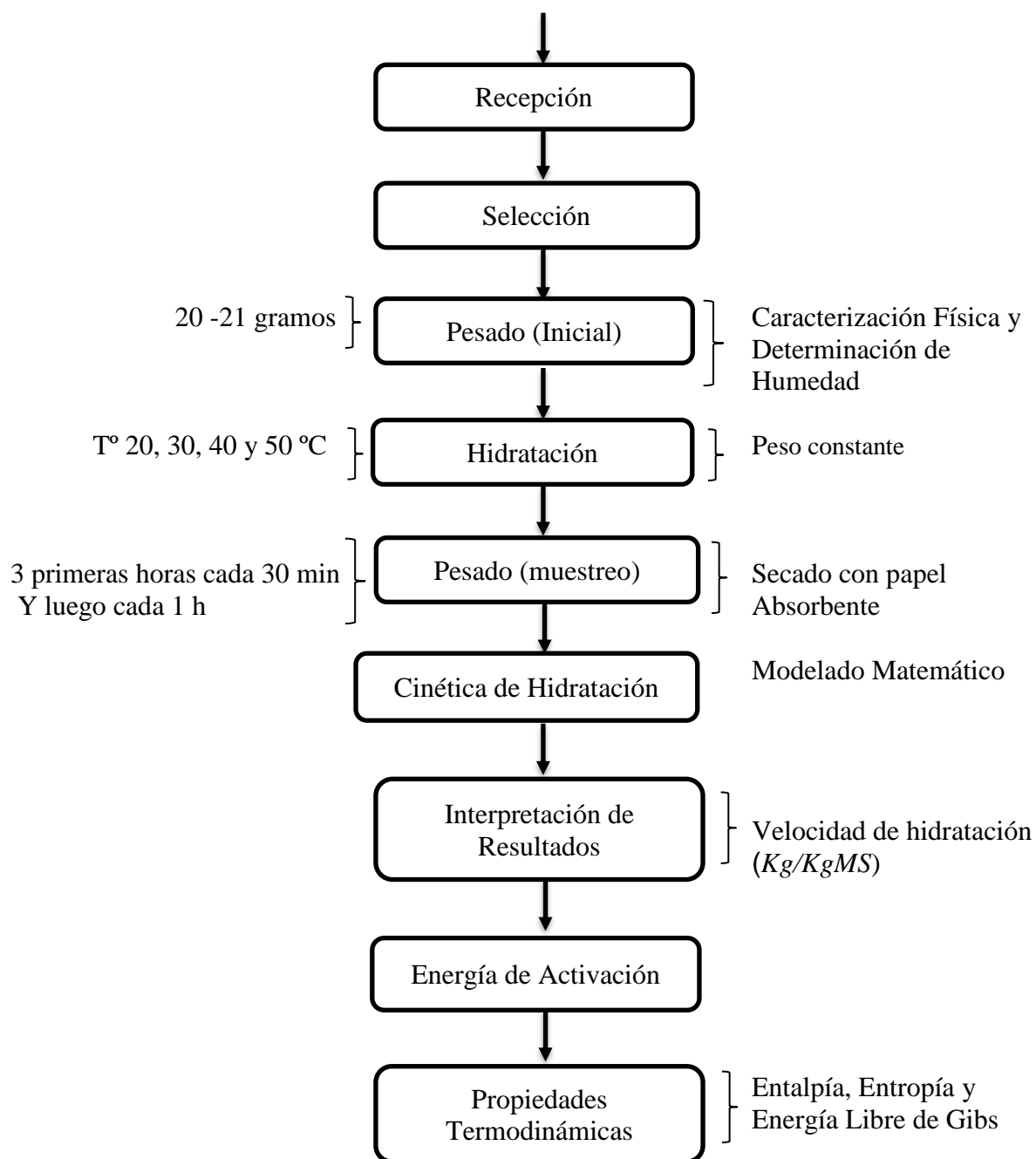


Figura 3. Metodología Experimental de la Hidratación de Habas (*Vicia Faba L.*) de la Variedad Gigante de Yunguyo.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. Caracterización física de materia prima

Estas propiedades físicas se determinaron al inicio previa hidratación para la caracterización de la materia prima, se muestra en la Tabla (3).

Tabla 3.

*Caracterización de las propiedades físicas de habas de la variedad gigante de Yunguyo*

<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Habas Gigante de Yunguyo</b>
Contenido de Agua (%)	9.79 ± 0.03
Densidad Real, k/m <sup>3</sup>	1.03 ± 0.013
Densidad Aparente, kg/m <sup>3</sup>	0.53 ± 0.012
Porosidad Aparente, %	44.88 ± 0.01
Diámetro mayor inicial (a), mm	31.36 ± 1.14
Diámetro medio inicial (b), mm	21.28 ± 1.01
Diámetro medio inicial (c), mm	10.15 ± 1.12
Diámetro medio final (a), mm	39.15 ± 1.84
Diámetro medio final (b), mm	27.05 ± 1.63
Diámetro medio final (c), mm	13.76 ± 0.93
Diámetro Medio Geométrico inicial, mm	18.92
Diámetro Medio Geométrico final, mm	24.42
Esfericidad inicial%	60.34
Esfericidad final, %	62.39
Masa unitaria inicial, g	3.3617 ± 0.33

Fuente: propia

Según Tabla 3 el contenido de agua inicial de habas de la variedad gigante de Yunguyo fue de 9.79% resultado próximo a los granos de frijol y garbanzo con humedad inicial promedio de 9% (Shafaei et al., 2016) lentejas rojas enteras con humedad inicial de 8.6% (Kumar et al., 2018) y amaranto con humedad inicial de 10.5% (Resio et al., 2006).

Las densidades real y aparente de las habas fueron menores que los determinados por (Oroian, 2017)(Kumar et al., 2018) y (Pumacahua, 2011) en lentejas cafés, lentejas rojas y quinua, la porosidad aparente de 44% porcentajes similares a los de quinua 42%, lentejas 46%, lentejas rojas 43% y grano Teff 38%. El diámetro medio geométrico de 4.8706 y la esfericidad de 71.9486 superiores a los de las lentejas y la quinua.

#### 4.2. Curvas de hidratación

Se hidrato aproximadamente 20-21 gramos de habas de la variedad gigante de Yunguyo en tres repeticiones a 4 temperaturas (20, 30, 40 y 50°C) hasta obtener peso constante.

Tabla 4

*Tiempo de hidratación hasta peso constante por cada temperatura*

Temperatura (°C)	Tiempo (horas)
20	30
30	28
40	25
50	23.5

En la tabla 5 se observa una relación inversa de la temperatura de hidratación y el tiempo. Pues a mayor temperatura, se requiere menor tiempo de hidratación. Resultados semejantes fueron reportados para la hidratación de habas (Ccopa Mendoza, 2015), Trigo (Mattioda et al., 2018) lentejas (Oroian, 2017), soja (Fracasso et al., 2014) cuatro variedades de frijol (Ulloa et al., 2016) y arroz integral (Cheevitsopon & Noomhorm, 2011)

En la Figura 4 se visualiza las curvas de hidratación obtenidas de las cuatro temperaturas.

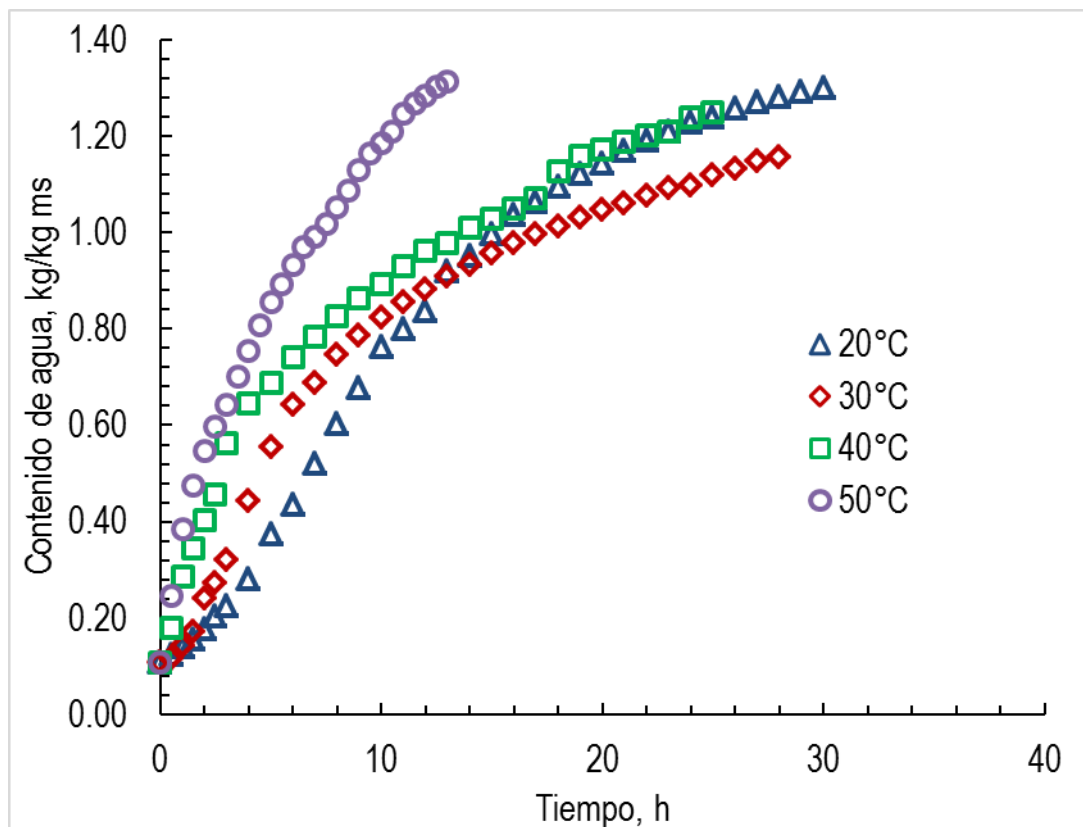


Figura 4. Curvas de hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo a cuatro temperaturas.

En la Figura 4 observamos el efecto de la temperatura sobre el contenido de agua a través del tiempo, a medida que incrementa la temperatura incrementa la absorción inicial y el tiempo de hidratación disminuye, resultados similares se reportaron en hidratación de cuatro variedades de frijol (Ulloa et al., 2016), amaranto (Resio et al., 2006), arroz Paddy (Balbitoti et al., 2017), arroz Tarom tahalí (Kashaninejad et al., 2007), arroz (Bello et al., 2007) y arvejas (Cerón et al., 2016)..

En las temperaturas 20°C y 30°C el comportamiento de la curva es sigmoide (es forma de S) a medida que aumenta la temperatura 40 y 50°C las curvas son netamente exponenciales esto podría ser debido a la fase lag inicial es decir un período con baja absorción en bajas temperaturas (20°C y 30°C) similar comportamiento se ha reportado en la hidratación de frijoles adzuki (Oliveira et al., 2013), granos de guisante (Omoto et al., 2009), habas (Gumucio del Villar, 2014), soja (Coutinho et al., 2005) y lupino (Augusto & Miano, 2016) (Solomón, 2008).

Asimismo observamos un comportamiento singular en las curvas de 20°C y 30°C que se intersectan aproximadamente después de las 12 h de hidratación por ello se podría decir que no existe mucha diferencia entre las temperaturas puesto que se podría hidratar habas a 20°C obteniendo resultados similares al de 30°C gastando menos energía, similar comportamiento se observó en la hidratación de habas de la variedad Gigante de Yunguyo (Ccopa Mendoza, 2015) en las curvas de las temperaturas de 20°C y 30°C que se intersectaron aproximadamente a las 10 horas y 30 minutos del tiempo de hidratación luego de esa intersección la hidratación fue casi similar hasta el final de la curva.

(Sabapathy, 2015) Menciona que el incremento de la temperatura provoca cambios en la estructura de la pared celular, la composición y la compacidad del grano por lo que los granos podrían contener más agua en su estructura. En el estudio de la cinética de hidratación justamente estudiamos esos cambios en el grano y la velocidad en los cuales surgen.

#### 4.3. Resultados de velocidad de hidratación

La Figura 5, muestra la velocidad de hidratación graficada utilizando el modelo de Weibull, según Ecuación 23.

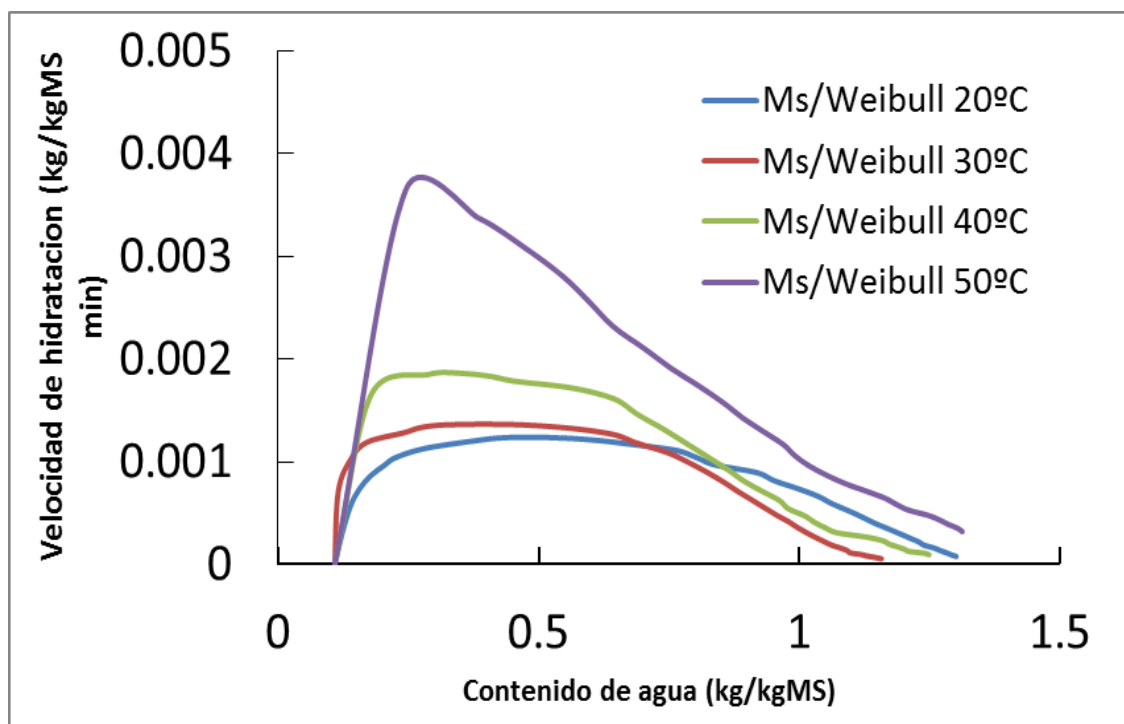


Figura 5. Curvas de velocidad de hidratación de habas

En la figura 5 observamos que la velocidad de hidratación aumenta con el incremento de temperatura, puesto que el pico más alto se muestra en la temperatura de 50°C.

#### 4.4. Modelamiento matemático

Los puntos experimentales del contenido de agua de las habas fueron ajustados a los 13 modelos matemáticos, siendo 11 modelos empíricos y 2 fenomenológicos.. Se escogió el modelo más adecuado para la hidratación según (Vidal, Maupoey, & Tarraza, 1986) que mencionan que a valores inferiores de 10% en la raíz del error cuadrado medio MAE% el modelo matemático tiene un buen ajuste.

#### 4.4.1. Modelos matemáticos empíricos

##### 4.4.1.1. Modelo matemático de Peleg

En la tabla 6 se muestran el resultado de las constantes del modelo Peleg y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 5.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Peleg*

Modelo	T (°C)	$k_1$	$k_2$	$R^2$	MRSE	MAE%
PELEG	20	670.91	0.42	0.98	0.05	13.47
	30	430.62	0.70	0.99	0.04	10.52
	40	344.93	0.65	0.99	0.02	2.94
	50	247.28	0.51	0.99	0.02	2.56
		<b>423.44</b>	<b>0.57</b>	<b>0.99</b>	<b>0.03</b>	<b>7.37</b>

En la Tabla 6 observamos en el modelo Peleg que la constante  $k_1$  disminuye con el incremento de la temperatura de 670.91 a 247.28; según Kumar, M.M. (2018) el término (1/K1) se denomina tasa de absorción inicial, por tanto cuanto menor sea el valor de  $k_1$  mayor será la tasa de absorción de agua e inversamente relacionada con la temperatura. Asimismo la constante  $k_2$  aumento con el incremento de la temperatura de 0,42 a 0.51; según (Sharanagat et al., 2018) menciona que conforme incremente la temperatura aumenta la capacidad de absorción de agua visible en el aumento del valor de constante  $k_2$ ,

tal capacidad de absorción depende de la estructura de la pared celular del alimento, de la composición de los granos y de la compacidad de sus células. Al realizar el ajuste de modelo observamos que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es de 0.99 dato cercano a 1, (Ccopa, 2015) también obtuvo en habas un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.99, asimismo el error cuadrado medio (RMSE) fue de 0.03 dato cercano a 0 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 7.37 menor al 10% con éstos valores fue el quinto modelo con mejor ajuste en este trabajo. Otros investigadores también usaron este modelo para modelar la cinética de hidratación de diversos granos lentejas rojas (Kumar, Prasad, Chandra, & Debnath, 2018), garbanzo (Pramiu, Rizzi, do Prado, Coelho, & Bassinello, 2015), amaranto (Resio Calzetta, Aguerre, & Suarez, 2006), grano moong (Sharanagat, Kansal, & Kumar, 2018), tres variedades de frijol y garbanzo (Shafaei, Masoumi, & Roshan, 2016), lenteja (Oroian, 2017), grano teff (Sadik, Demelash, & Gizaw, 2013), lupino tostado (Solomón, 2008), soja (Couthino et al., 2005), arvejas (Cerón et al., 2016), ñaña (Siccha Reyes, 2015) y quinua (Pumacahua et al., 2012).

En la Figura 6 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo Peleg.

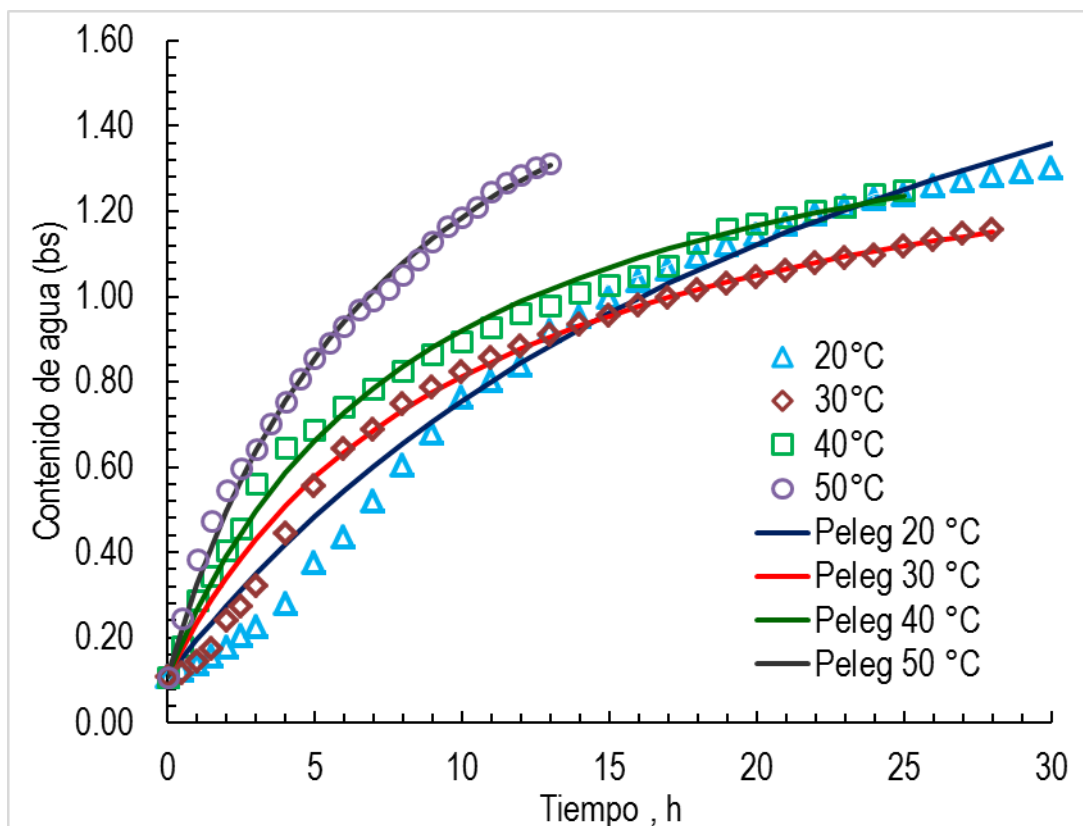


Figura 6. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Peleg

En la Figura 6 observamos que el modelo Peleg ajusta mejor en las temperaturas 40 y 50°C a diferencia de las temperaturas 20 y 30°C que ajustan bien solamente en la parte final de la curva, en la hidratación de frijoles de la variedad azufrado, peruano bola y mayacoba (Ulloa, Ulloa, Ramírez Ramírez, & Ulloa Rangel, 2016) y frijol talash (Shafaei, Masoumi, & Roshan, 2016) se manifestó el mismo comportamiento.

#### 4.4.1.2. Modelo matemático Page

En la tabla 7 se muestran el resultado de las constantes del modelo Page y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 6.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Page*

Modelo	T (°C)	$k_1$	$n$	$R^2$	MRSE	MAE%
PAGE	20	$3.60 \times 10^{-5}$	1.55	0.99	0.01	1.62
	30	$8.77 \times 10^{-5}$	1.46	0.98	0.05	6.34
	40	$1.37 \times 10^{-3}$	1.06	0.98	0.04	6.19
	50	$4.01 \times 10^{-4}$	1.35	0.98	0.07	8.79
		<b><math>4.74 \times 10^{-4}</math></b>	<b>1.36</b>	<b>0.98</b>	<b>0.04</b>	<b>5.74</b>

En el modelo Page según la Tabla 7 la constante  $k$  tiene el valor promedio de  $4.74 \times 10^{-4}$  y  $n$  de 1.36 constante que no presentan dependencia de la temperatura. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.98, en investigaciones de cinética de hidratación de granos de arroz integral y arroz blanco ajusto este modelo con un ( $R^2$ ) de 0.99 y 0.97 respectivamente (Kashaninejad et al., 2007)(Cheevitsopon & Noomhorm, 2011), asimismo observamos que el modelo Page ajusta mejor en la temperatura 20°C con un ( $R^2$ ) de 0.99 y en 0.98 en la temperatura de 50°C, el error cuadrático medio (RSME) de 0.04 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 5.74 siendo así el tercer modelo con mejor ajuste. Este modelo fue usado en cinética de secado con un buen ajuste en el secado de limón (Puente Díaz, Echegaray Pacheco, Castro Montero, & Di Scala, 2013), mashua (Apaza Mamani, 2018), aguacate (Avhad & Marchetti, 2016), jatropha curcas (Kenedi, Trine, Eide, & Marchetti, 2019) y papaya (Vega & Lemus, 2006).

En la Figura 7 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo Page.

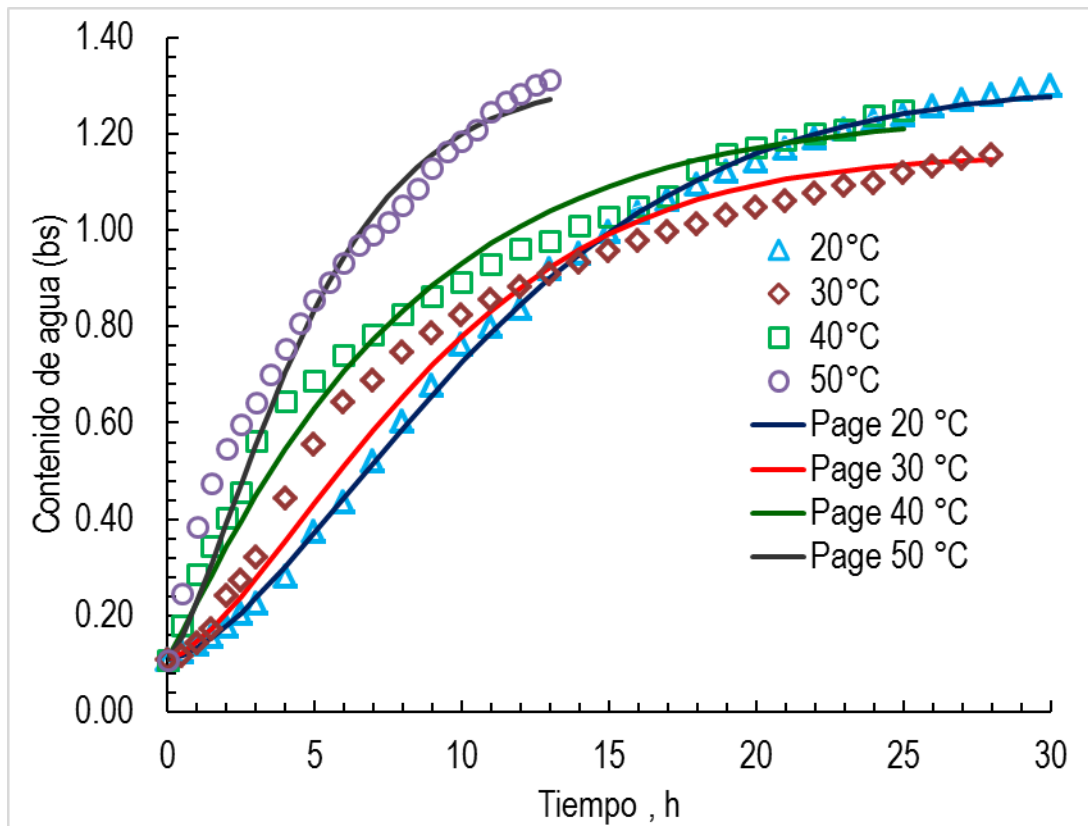


Figura 7. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Page

En la Figura 7, se observa que el modelo Page ajusta mejor en la temperatura de 20°C en toda la curva, en la temperatura de 30°C y 40°C el modelo solo ajusta mejor en la parte inicial, media y ultima y en la temperatura 50°C el modelo ajusta solo en algunas partes de la curva experimental. Similares resultados fueron reportados por (Kashaninejad, Maghsoudlou, Rafiee, & Khomeiri, 2007) en la cinética de hidratación de arroz Taron Mahali aplicando el modelo Page.

#### 4.4.1.3. Modelo matemático Lewis

En la tabla 8 se muestran el resultado de las constantes del modelo Lewis y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.



Tabla 7.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Lewis*

Modelo	T (°C)	$k$	$R^2$	MRSE	MAE%
LEWIS	20	$1.3 \times 10^{-3}$	0.99	0.10	17.18
	30	$1.9 \times 10^{-3}$	0.99	0.16	8.95
	40	$2.1 \times 10^{-3}$	0.98	0.04	4.70
	50	$3.3 \times 10^{-3}$	0.98	0.05	4.00
		<b><math>2.1 \times 10^{-3}</math></b>	<b>0.99</b>	<b>0.08</b>	<b>8.70</b>

El modelo de Lewis sólo tiene una constante que es  $k$  (constante de velocidad de absorción) usado en cinética de secado de uvas negras (Doymaz, 2006), quinua (Pumacahua et al., 2012) y mashua (Apaza, 2018) así también en cinética de hidratación de arroz integral (Cheevitsopon & Noomhorm, 2011). Según la Tabla 8 en la hidratación de habas la constante  $k$  incrementa con el aumento de la temperatura de  $1.3 \times 10^{-3}$  a  $3.3 \times 10^{-3}$  como en el trabajo de hidratación de arroz integral de  $16.6 \times 10^{-3}$  a  $48.410^{-3}$  (Cheevitsopon & Noomhorm, 2011), según la Tabla 8 el modelo Lewis obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.99, un error cuadrado medio (RSME) de 0.08 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 8.70 siendo así el noveno modelo con mejor ajuste.

La Figura 8 nos muestra las curvas de hidratación de habas en las cuatro temperaturas ajustadas con el modelo Lewis, en las temperaturas 40°C y 50°C observamos que la curva experimental se encuentra próximo de la curva del modelo Lewis y en las temperaturas 20°C y 30°C más distantes, por lo cual se podría decir que el modelo ajusta mejor a temperaturas mayores.

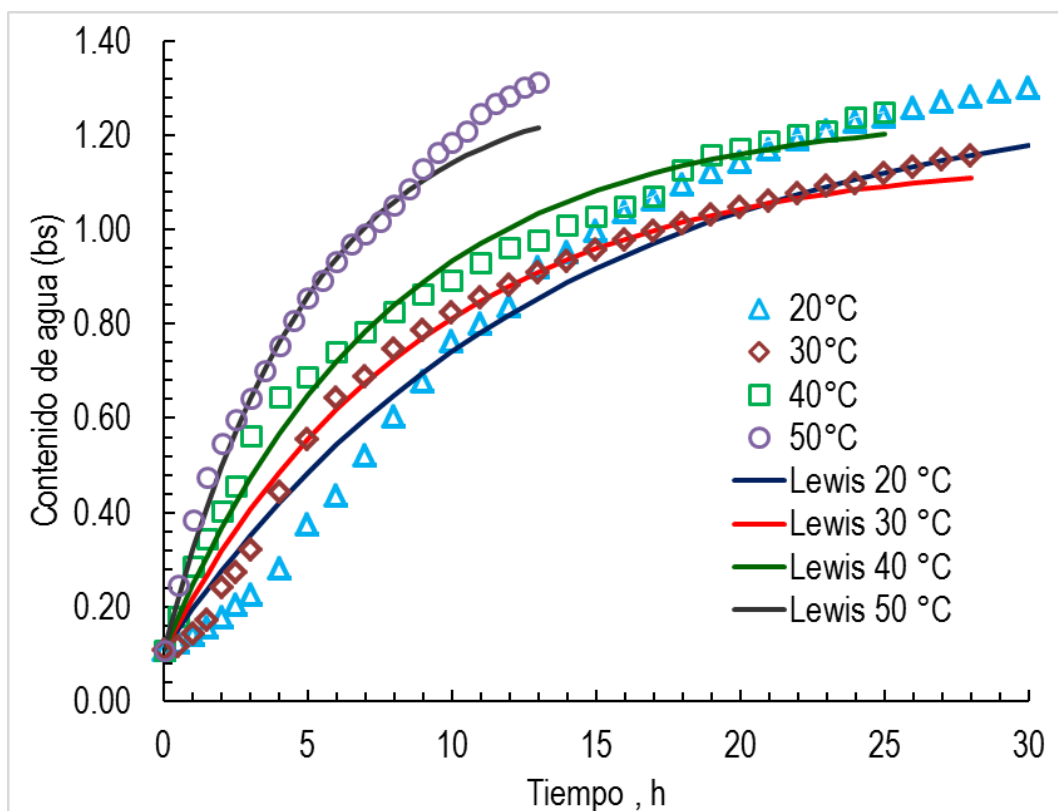


Figura 8. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Lewis

#### 4.4.1.4. Modelo matemático Henderson y Pabis

En la tabla 9 se muestran el resultado de las constantes del modelo Henderson y Pabis y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 8.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Henderson y Pabis*

Modelo	T (°C)	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	MRSE	MAE%
HENDERSON	20	1.07	$1.7 \times 10^{-3}$	0.94	0.08	16.81
Y PABIS	30	1.09	$2.0 \times 10^{-3}$	0.95	0.03	6.67
	40	0.95	$2.0 \times 10^{-3}$	0.98	0.04	5.68
	50	0.98	$3.2 \times 10^{-3}$	0.99	0.05	4.32
		<b>1.02</b>	<b><math>2 \times 10^{-3}</math></b>	<b>0.96</b>	<b>0.04</b>	<b>8.37</b>

El modelo de Henderson y Pabis fue usado en el estudio de cinética de secado de glacialaria chilena (Vega Gálvez, Tello Ireland, & Lemus Mondaca, 2007), biomasa (Villalba Vidales & Arzola de la Peña, 2015) y papaya chilena (Vega & Lemus, 2006) asimismo en la hidratación de lentejas rojas (Kumar, Prasad, Chandra, & Debnath, 2018), arroz blanco (Kashaninejad, Maghsoudlou, Rafiee, & Khomeiri, 2007), arroz integral (Cheevitsopon & Noomhorm, 2011), arroz con cáscara (Balbitoti, Jorge, & Jorge, 2017) y quinua (Pumacahua et al., 2012). Las constantes  $a$  y  $k$  son las determinadas en la Ecuación 30 del modelo Henderson y Pabis que de acuerdo a la Tabla 6  $a$  no es dependiente de la temperatura mientras que  $k$  incrementa de  $1.7 \times 10^{-3}$  a  $3.2 \times 10^{-3}$  con el aumento de temperatura, este fenómeno también ocurrió en la hidratación de lentejas rojas y quinua. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.96, el error cuadrático medio (RMSE) de 0.04 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 8.37 que nos indica que es el séptimo mejor modelo de ajuste en la cinética de hidratación de habas.

En la Figura 9 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo Henderson y Pabis a la hidratación de habas.

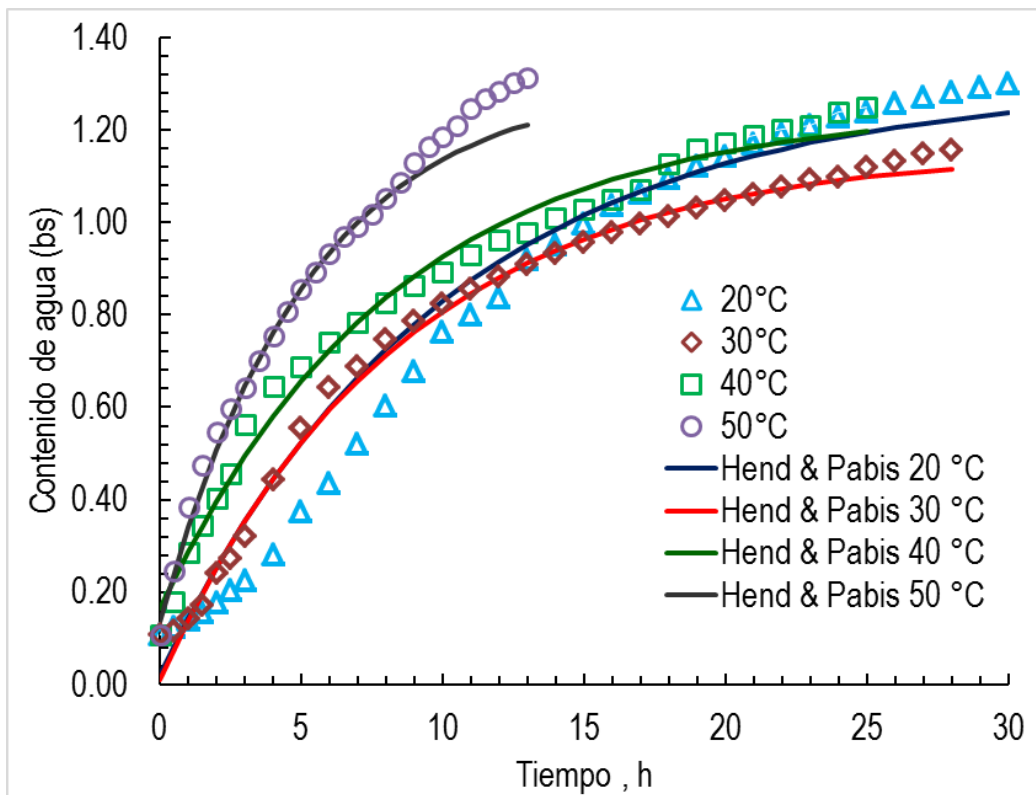


Figura 9. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Henderson-Pabis

Según la Figura 9 el modelo Henderson y Pabis ajusta mejor en las temperaturas 30°C, 40°C y 50°C a diferencia de la temperatura 20°C, asimismo en las temperaturas 20°C y 30°C la curva de los datos experimentales se encuentra próxima de la curva del modelo matemático, comportamiento diferente se observó en la hidratación de arroz Paddy (Balbitoti, Jorge, & Jorge, 2017) donde el modelo ajustó mejor en la temperatura 35°C que en las demás temperaturas.

#### 4.4.1.5. Modelo matemático Logarítmico

En la tabla 10 se muestran el resultado de las constantes del modelo Logarítmico y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 9.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Logarítmico*

Modelo	T (°C)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>k</i>	$R^2$	MRSE	MAE%
LOGARITMICO	20	1.07	$1 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-3}$	0.94	0.07	15.11
	30	1.09	0	$2.0 \times 10^{-3}$	0.95	0.03	6.54
	40	0.95	0	$2.0 \times 10^{-3}$	0.98	0.04	5.68
	50	0.98	0	$3.2 \times 10^{-3}$	0.99	0.05	4.32
			<b>1.02</b>	<b>0</b>	<b><math>2.2 \times 10^{-3}</math></b>	<b>0.97</b>	<b>0.05</b>

El modelo Logarítmico fue el que ajustó mejor con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.99 en el secado de descartes de limón (Díaz, 2013) en el cual se obtuvo un error cuadrático medio (RMSE) de 0.08, la suma de cuadrados del error (SSE) de  $1 \times 10^{-3}$  y chi cuadrado ( $\chi^2$ ) de  $3 \times 10^{-3}$  valor cercano a 0 valor por el cual se determinó como mejor modelo, además notamos que con el incremento de la temperatura (30-50°C) la constante *a* disminuye de 1.12 a 0.95 y las constantes *b* y *k* incrementan de  $-7.5 \times 10^{-3}$  a  $6.1 \times 10^{-2}$ ,  $4.7 \times 10^{-3}$  a  $2.3 \times 10^{-2}$  respectivamente. En la hidratación de habas según la Tabla 10 el modelo obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.97, un error cuadrático medio (MRSE) de 0.05 y la raíz del error del cuadrado medio (MAE%) de 7.91 siendo así el sexto modelo son mejor ajuste, se vio el mismo comportamiento que en la cinética de secado en

las constantes del modelo que con el aumento de temperatura (20-50°C)  $a$  disminuye de 1.07 a 0.98 y  $k$  incrementa de  $1.5 \times 10^{-3}$  a  $3.2 \times 10^{-3}$ .

En la Figura 10 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo Logarítmico en la hidratación de habas a cuatro temperaturas:

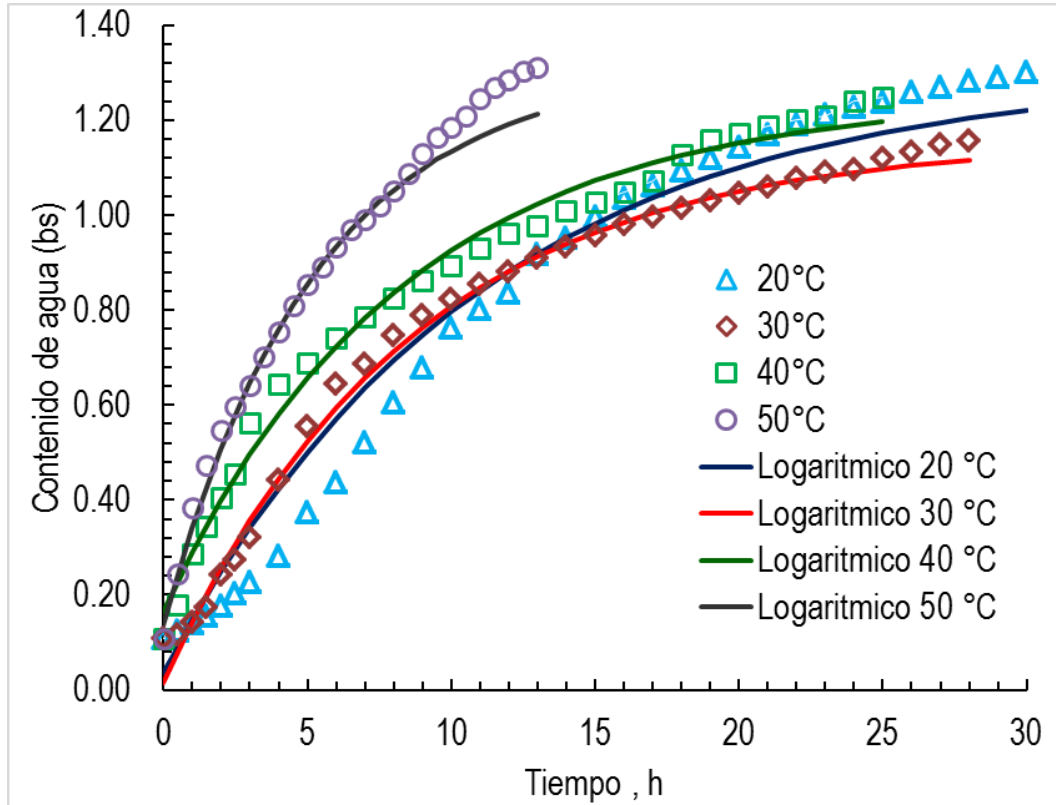


Figura 10. Curvas de hidratación mediante la ecuación del modelo Logarítmico

En la Figura 10 observamos que en las temperaturas 20°C y 30°C el modelo no ajusta, esto puede ser debido a que las curvas de hidratación de éstas temperaturas tengan un comportamiento netamente sigmoidal a comparación de las temperaturas 40°C y 50°C que son más exponenciales.

#### 4.4.1.6. Modelo matemático Weibull

En la tabla 11 se muestran el resultado de las constantes del modelo Weibull y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 10.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Weibull*

Modelo	T (°C)	<i>a</i>	<i>k</i>	$R^2$	MRSE	MAE%
WEIBULL	20	1.53	720.52	0.99	0.01	2.07
	30	1.32	563.34	0.99	0.04	4.82
	40	1.12	483.29	0.97	0.06	7.34
	50	1.01	305.18	0.98	0.04	4.08
		<b>1.24</b>	<b>518.08</b>	<b>0.99</b>	<b>0.03</b>	<b>4.57</b>

El modelo Weibull propone la función exponencial que tiene 2 constantes *a* y *k* que se ha usado para determinar las cinéticas de hidratación de diversos granos, garbanzo (Prasad, Vairagar, & Bera, 2010), arroz Paddy (Balbitoti, Jorge, & Jorge, 2017), lentejas (Oroian, 2017) y granos de cebada (Montanuci, Matos Jorge, & Matos Jorge, 2015), en las hidrataciones mencionadas como en el presente trabajo el valor de la constante *k* disminuye con el incremento de la temperatura de 720.52 a 305.18 y la constante *a* no es dependiente de la temperatura. Según la Tabla 11 el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es de 0.99, el error cuadrático medio (RMSE) de 0.03 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 4.57 valor óptimo siendo así el modelo con mejor ajuste, valores similares fueron reportados en la hidratación de garbanzo, arroz Paddy, lenteja y cebada.

En la Figura 11 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo Weibull en la hidratación de habas a cuatro temperaturas:

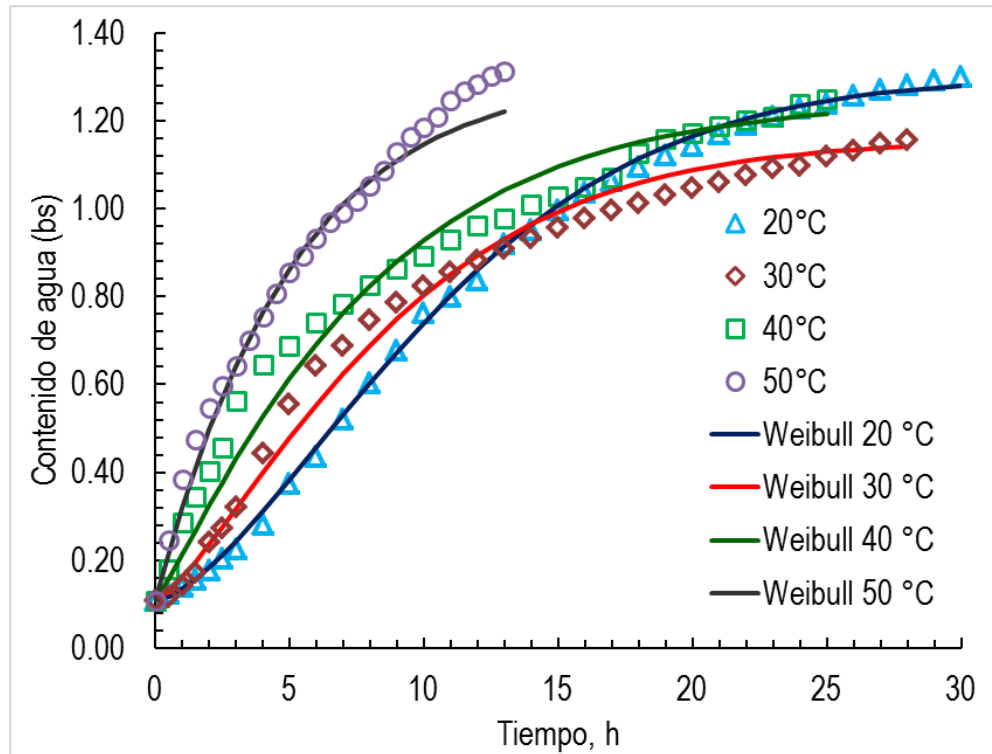


Figura 11. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Weibull

Por la Figura 11 observamos que el modelo Weibull es el mejor modelo de ajuste en la hidratación de habas, las curvas experimentales se aproximan más a las curvas del modelo mencionado por lo tanto el error es menor, en una investigación realizada por (Prasad, Vairagar, & Bera, 2010) de hidratación de garbanzo PBG-1 se muestra en la curva semejante comportamiento ajustando así a todas las temperaturas.

#### 4.4.1.7. Modelo matemático dos Términos

En la tabla 12 se muestran el resultado de las constantes del modelo dos Términos y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 11.

Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático de dos Términos

Modelo	T (°C)	$a$	$k_1$	$k_2$	$b$	$R^2$	MRSE	MAE%
DOS	20	0	0.81	1.15	$1.7 \times 10^{-3}$	0.94	0.07	17.46
TÉRMINOS	30	$9 \times 10^{-3}$	0.81	1.09	$2.0 \times 10^{-3}$	0.95	0.03	6.82
	40	0	0.81	0.95	$2.0 \times 10^{-3}$	0.98	0.04	5.68
	50	0	0.81	0.97	$3.1 \times 10^{-3}$	0.99	0.05	4.35
			$2.25 \times 10^{-3}$	<b>0.81</b>	<b>1.04</b>	$2.2 \times 10^{-3}$	<b>0.96</b>	<b>0.04</b>

El modelo de dos Términos es una función exponencial con constantes  $a$ ,  $k_1$ ,  $b$  y  $k_2$  que no son dependientes de la temperatura, fue usado en la hidratación de lentejas rojas (Kumar, Prasad, Chandra, & Debnath, 2018), arroz Tarom mahali (Kashaninejad, Maghsoudlou, Rafiee, & Khomeiri, 2007) y arroz integral (Cheevitsopon & Noomhorm, 2011) con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.99, 0.93, 0.99 para lentejas rojas, arroz Tarom mahali y arroz integral respectivamente. En la hidratación de habas según la Tabla 12 el modelo de dos Términos obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.96, el error cuadrático medio (RMSE) de 0.04 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 8.58 menor al 10% siendo así el octavo modelo con mejor ajuste.

En la Figura 12 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo de dos Términos a la hidratación de habas a cuatro temperaturas:

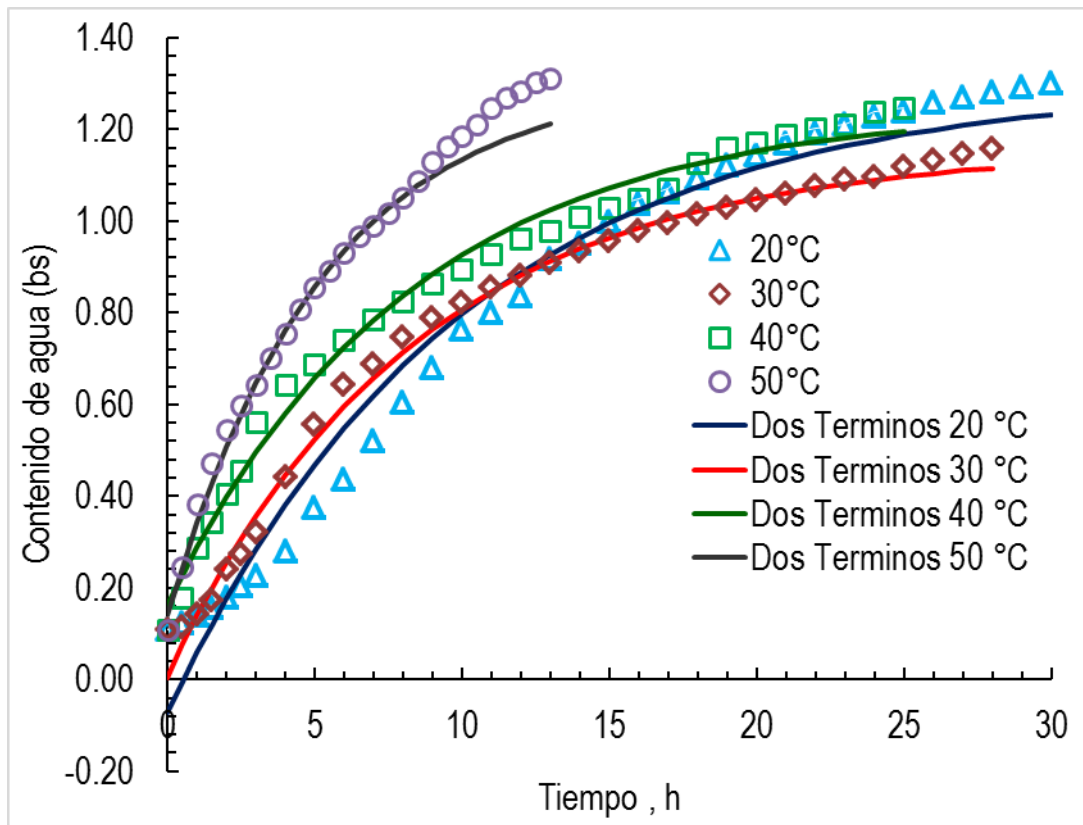


Figura 12. Curvas de hidratación mediante la ecuación del modelo de dos Términos

El gráfico de la Figura 12 nos muestra que a la temperatura de 20°C el modelo no ajusta en la parte inicial y final de la curva experimental sin embargo en las temperaturas 30°C y 40°C el modelo ajusta mayormente en toda la curva y en la temperatura 50°C de igual manera solo en la parte final las curvas se distancian, podríamos decir entonces al



igual que el modelo de Lewis a mayores temperaturas el modelo tiene un mejor ajuste sin embargo el porcentaje de error en el ajuste de la curva es ligeramente mayor que el del modelo de Lewis, (Kumar, Prasad, Chandra, & Debnath, 2018) en la hidratación de lentejas rojas se observó similar comportamiento de las curvas experimentales y el ajuste de modelo de dos términos.

#### 4.4.1.8. Modelo matemático Aproximación a la Difusión

En la tabla 13 se muestran el resultado de las constantes del modelo de aproximación a la Difusión y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 12.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático aproximación a la Difusión*

Modelo	T (°C)	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	MRSE	MAE%
APROXIMACIÓN	20	1.28	9 x10 <sup>-4</sup>	1.10x10 <sup>-8</sup>	0.95	0.05	12.36
A LA DIFUSIÓN	30	1.04	1.7x10 <sup>-3</sup>	3.78x10 <sup>-8</sup>	0.96	0.03	8.29
	40	1.03	2.0x10 <sup>-3</sup>	1.29x10 <sup>-8</sup>	0.98	0.04	5.03
	50	1.12	2.7x10 <sup>-3</sup>	2.33x10 <sup>-8</sup>	0.98	0.03	3.67
		<b>1.12</b>	<b>1.8x10<sup>-3</sup></b>	<b>2.12x10<sup>-8</sup></b>	<b>0.97</b>	<b>0.04</b>	<b>7.34</b>

Este modelo exponencial de aproximación a la Difusión cuenta con 3 constantes *a* y *b* no dependientes y *k* dependiente de la temperatura. En el presente trabajo de hidratación de habas según la Tabla 6 el modelo tuvo un buen ajuste con coeficiente de determinación (*R*<sup>2</sup>) de 0.97, el error cuadrático medio (RMSE) de 0.04 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 7.34, (Apaza Mamani, 2018) obtuvo valores próximos de MAE% 6.47 en la cinética de secado de mashua; por los valores obtenidos el modelo fue el cuarto con mejor ajuste en la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo.

En la Figura 13 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo de aproximación a la Difusión de la hidratación de habas a cuatro temperaturas.

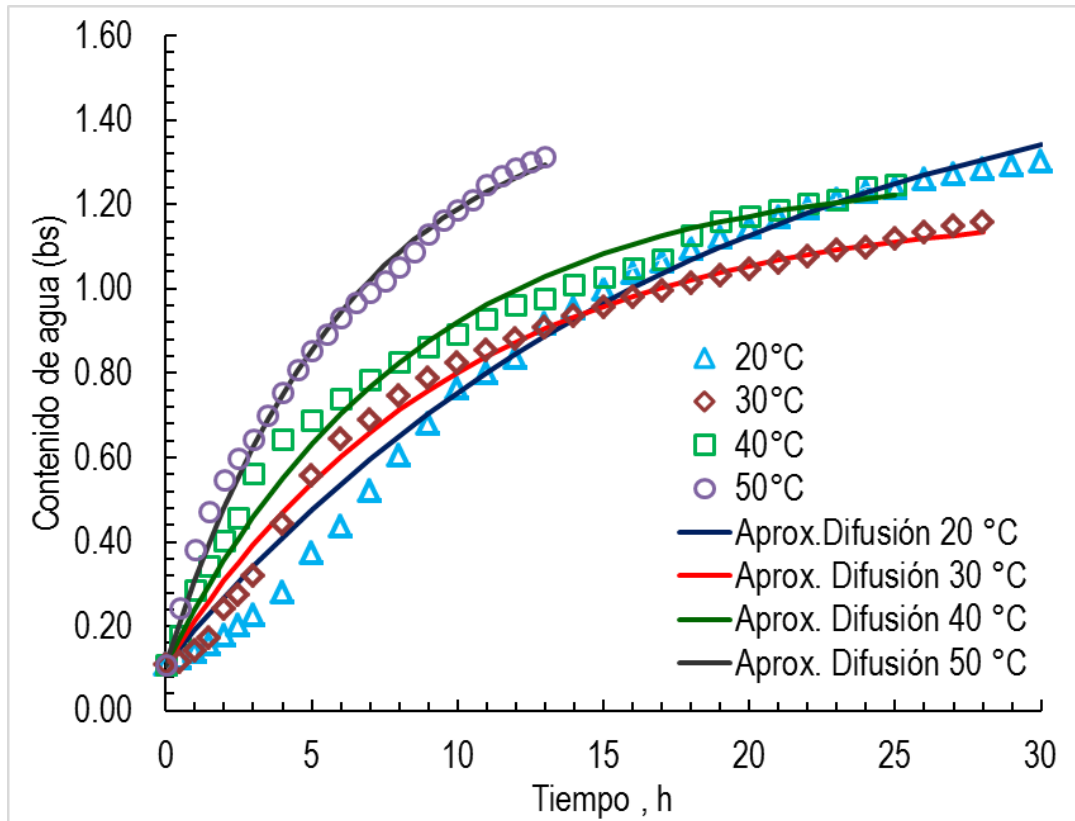


Figura 13. Curvas de hidratación mediante la ecuación Aproximación a la Difusión

En la Figura 13 el observamos que en la temperatura 20°C por tener un comportamiento netamente sigmoidal la curva experimental el modelo de aproximación no ajusta muy bien en la parte inicial de la curva pero en las demás temperaturas ajusta mejor incluso con un error menor al modelo Peleg, teniendo este modelo mejor ajuste a medida que incrementa la temperatura por lo tanto se podría usar este modelo en la hidratación de habas si se desea obtener un buen ajuste a las curvas experimentales.

#### 4.4.1.9. Modelo matemático Midilli

En la tabla 14 se muestran el resultado de las constantes del modelo Midilli y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

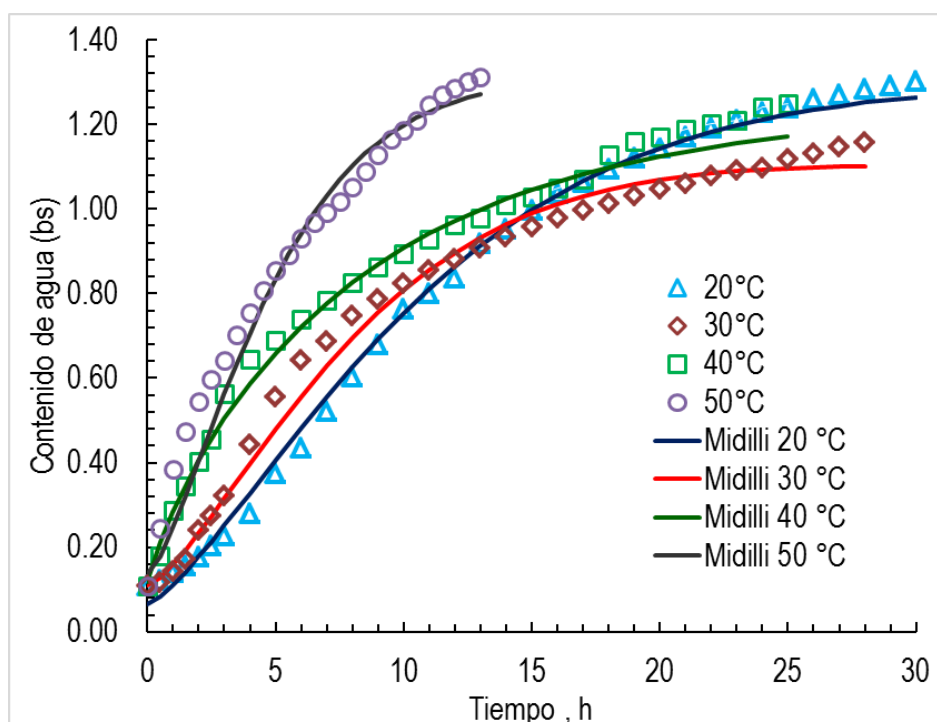
Tabla 13.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Midilli*

Modelo	T (°C)	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	MRSE	MAE%
MIDILLI	20	1.04	1.6x10 <sup>-4</sup>	1.34	0	0.99	0.02	5.66
	30	1.00	2x10 <sup>-3</sup>	1.36	0	0.99	0.03	4.42
	40	0.99	4.3x10 <sup>-3</sup>	0.88	0	0.99	0.04	3.59
	50	0.98	3.6x10 <sup>-3</sup>	1.37	0	0.94	0.06	8.80
		<b>1.00</b>	<b>1.3x10<sup>-3</sup></b>	<b>1.24</b>	<b>0</b>	<b>0.98</b>	<b>0.04</b>	<b>5.62</b>

El modelo de Midilli tiene 4 variables *a*, *b*, *n* y (*k*) que es dependiente de la temperatura, el modelo en la hidratación de habas ha mostrado un buen ajuste en especial en la temperatura de 30°C con un MAE% de 4.42; fue el segundo modelo con mejor ajuste según la Tabla 14 con un coeficiente de determinación (*R*<sup>2</sup>) de 0.98, un error cuadrático medio (MRSE) de 0.04 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 5.62, no se encontró trabajos de hidratación con este modelo sin embargo (Apaza Mamani, 2018) lo uso en la cinética de secado de mashua con un coeficiente de determinación (*R*<sup>2</sup>) de 0.99 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 1.15 siendo así el segundo modelo con mejor ajuste.

En la Figura 14 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo de Midilli en la hidratación de habas a cuatro temperaturas:



*Figura 14. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Midilli*

En la Figura 14 observamos que el modelo Midilli tiene un buen ajuste en las tres primeras temperaturas 20°C, 30°C y 40°C a comparación de la temperatura de 50°C que no ajusta bien al inicio de la curva entonces podríamos decir que este modelo ajusta mejor a temperaturas más bajas, sin embargo el modelo Midilli es el segundo modelo con mejor ajuste después del modelo Weibull debido a que las curvas del modelo se aproximan más a las curvas experimentales. Se mostró un comportamiento similar en el trabajo de cinética de secado de mashua (Apaza, 2018).

#### 4.4.1.10. Modelo matemático Singh y Kulshrestha

En la tabla 15 se muestran el resultado de las constantes del modelo Singh y Kulshrestha y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 14.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Singh y Kulshrestha*

Modelo	T (°C)	$k$	$R^2$	MRSE	MAE%
SINGH Y KULSHRESTHA	20	$2.7 \times 10^{-3}$	0.87	0.17	35.37
	30	$3.7 \times 10^{-3}$	0.87	0.11	23.33
	40	$3.7 \times 10^{-3}$	0.99	0.08	7.12
	50	$6 \times 10^{-3}$	0.99	0.11	9.34
		<b><math>4 \times 10^{-3}</math></b>	<b>0.93</b>	<b>0.12</b>	<b>18.79</b>

El modelo de Singh y Kulshrestha tiene sólo una constante  $k$  dependiente de la temperatura y ha sido usado en la hidratación de granos de soja (Coutinho, Omoto, Andrade, & Jorge, 2005) a 10, 15, 20, 30, 42 y 49°C obteniendo a partir de regresiones no lineales un desvío cuadrático ( $\Phi$ ) de 0.46 a comparación de Peleg  $\Phi = 0.50$  siendo el cuarto modelo con mejor ajuste después del modelo de Peleg, fenomenológico generalizado y el de Parámetros Concentrados. Según la Tabla 15 en la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo el modelo obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.93, un error cuadrático medio (RMSE) de 0.12 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 18.79 valor que está por encima del 10% que según (Vidal, Maupoey, & Tarraza, 1986) no tiene un buen ajuste éste modelo.

En la Figura 15 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo de Singh y Kulshrestha en la hidratación de habas a cuatro temperaturas.

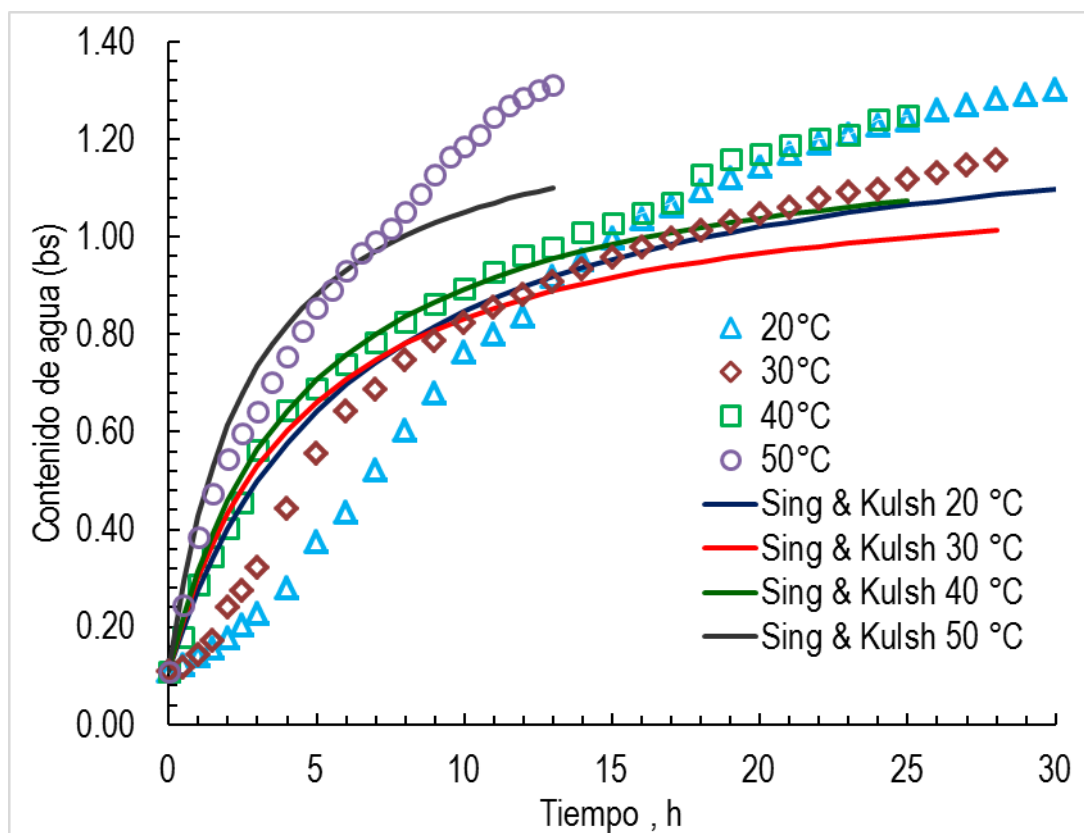


Figura 15. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Singh y Kulshrestha

Según la Figura 15 el modelo no ajusta bien a los datos experimentales de la hidratación de habas, observamos en la temperatura 20°C que sólo ajusta en la mitad de la curva, en la temperatura 30°C de igual manera, en la temperatura 40°C ajusta mejor desde el inicio hasta la mitad de la curva pero al final se distan y en la temperatura 50°C el modelo ajusta al inicio y la mitad de la curva; podríamos decir entonces que el modelo de Singh y Kulshrestha no ajusta a las curvas de hidratación de habas, resultados similares se obtuvieron por (Couthino, Omoto, Andrade, & Jorge, 2005) en la hidratación de soja donde el modelo Singh y Kulshrestha no ajusto bien a los datos experimentales.

#### 4.4.1.11. Modelo matemático Pilosof et al.

En la tabla 16 se muestran el resultado de las constantes del modelo Pilosof et al. y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 15.

Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Pilosof et al.

Modelo	T (°C)	$k_1$	$k_2$	$R^2$	MRSE	MAE%
PILOSOF ET AL.	20	2.44	1697.50	0.95	0.06	12.94
	30	2.29	1697.45	0.97	0.07	10.04
	40	2.71	1750.67	0.97	0.10	13.01
	50	4.23	1697.50	0.97	0.09	11.17
		<b>2.92</b>	<b>1710.78</b>	<b>0.96</b>	<b>0.08</b>	<b>11.79</b>

El modelo Pilosof et al. tiene 2 constantes  $k_1$  y  $k_2$  no dependientes de la temperatura que se usó en el presente trabajo, obteniendo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.96, un error cuadrático medio (RMSE) de 0.08 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 11.79 valor mayor al 10% siendo así un modelo que no ajusta a la hidratación de habas (Vidal et al.,1986).

En la Figura 16 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo de Pilosof et al. en la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo a cuatro temperaturas:

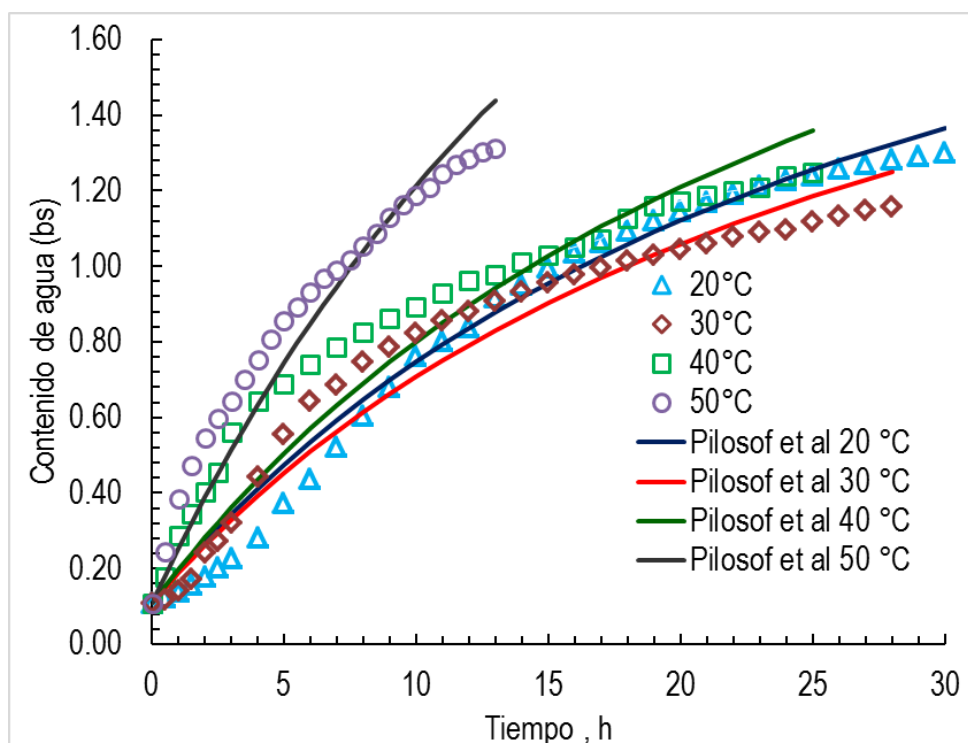


Figura 16. Curvas de hidratación mediante la ecuación de Pilosof et al.

En la Figura 16 observamos que en las temperaturas 30°C, 40°C y 50°C solo ajusta al inicio y mitad de la curva experimental a diferencia de la temperatura 20°C con mejor ajuste desde la mitad al final de la curva, sin embargo este modelo no ajusta bien, por ello podríamos decir que no es recomendable en el estudio de la cinética de hidratación de habas.

#### 4.4.2. Modelos matemáticos Fenomenológicos

##### 4.4.2.1. Parámetros concentrados

En la tabla 17 se muestran el resultado de las constantes del modelo Pilosof et al. y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 16.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo matemático Pilosof et al.*

Modelo	T (°C)	$k$	$R^2$	MRSE	MAE%
PARÁMETROS.	20	$4.06 \times 10^{-8}$	0.94	0.09	19.13
CONCENTRADOS	30	$5.15 \times 10^{-8}$	0.95	0.04	8.95
	40	$5.95 \times 10^{-8}$	0.99	0.04	4.70
	50	$9.04 \times 10^{-8}$	0.99	0.05	4.00
		<b><math>6.05 \times 10^{-3}</math></b>	<b>0.97</b>	<b>0.05</b>	<b>9.19</b>

El modelo fenomenológico de Parámetros Concentrados propuesto por (Omoto et al., 2009) tiene solo una constante  $k_s$  que incrementa con el aumento de la temperatura de  $4.06 \times 10^{-8}$  a  $9.04 \times 10^{-8}$  es decir la tasa de hidratación aumenta con la temperatura, (Couthino et al., 2010) menciona que el coeficiente de transferencia de masa aumenta con la temperatura y disminuye con una concentración creciente de agua dentro del grano. Según la Tabla 6 el modelo obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.97, un error cuadrático medio (RMSE) de 0.05 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 9.19 por el cual es el décimo modelo con mejor ajuste en la hidratación de habas, se usó también este modelo en la hidratación de soja transgénica sin embargo el modelo obtuvo bajos valores de  $R^2$  que el modelo Peleg.

En la Figura 17 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo de Parámetros Concentrados en la hidratación de habas a cuatro temperaturas.

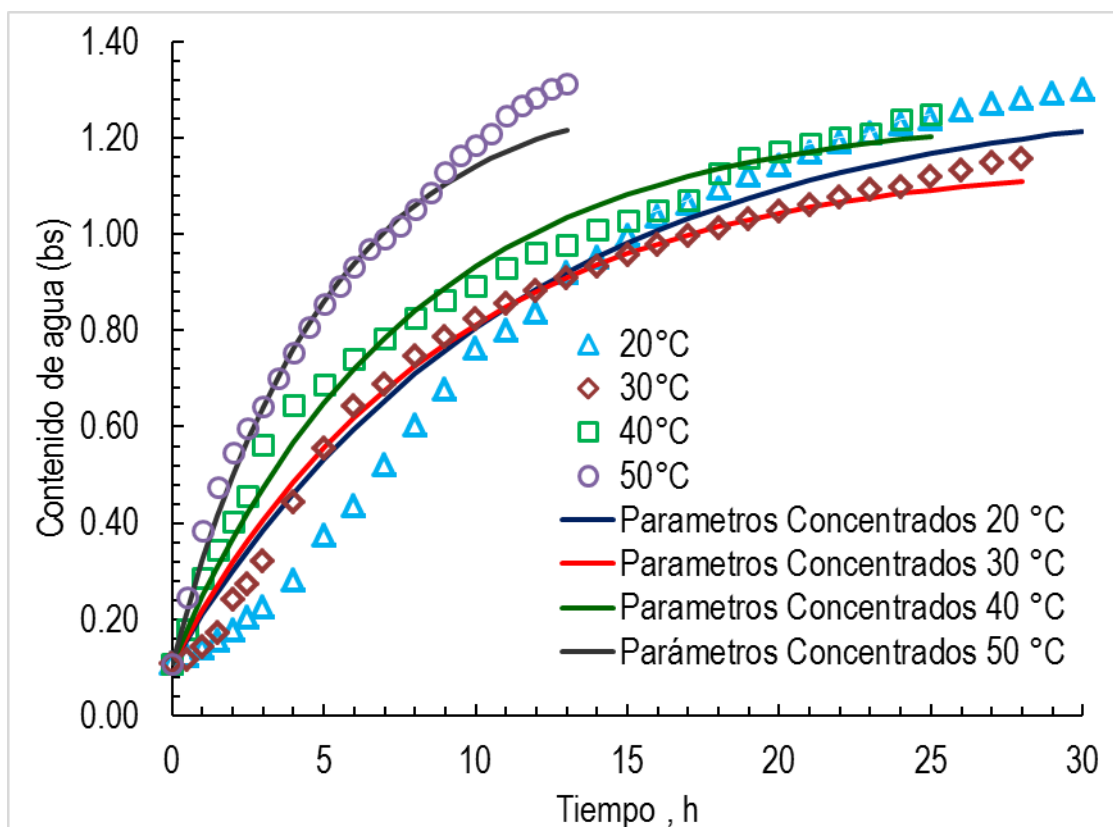


Figura 17. Curvas de hidratación de la ecuación de Parámetros Concentrados

En la Figura 17 notamos que el modelo fenomenológico de Parámetros Concentrados en la temperatura de 20°C ajusta solamente en el medio de la curva, en las temperaturas 20°C y 30°C ajusta en toda la curva experimental y en la temperatura 50°C ajusta mejor en toda la curva menos al final, que por conclusión podríamos decir que el modelo parámetros concentrados ajusta en la hidratación de habas a temperaturas mayores que 30°C.

#### 4.4.2.2. Segunda ley de Segunda ley de Fick

En la tabla 18 se muestran el resultado de las constantes del modelo difusivo de la Segunda ley de Fick y los parámetros estadísticos resultantes del ajuste a los datos experimentales.

Tabla 17.

*Constantes y parámetros estadísticos del modelo difusivo de la Segunda ley de Fick*



Modelo	T (°C)	$D_{ef}$	$R^2$	MRSE	MAE%
PARÁMETROS.	20	$1.25 \times 10^{-10}$	0.98	0.14	38.13
CONCENTRADOS	30	$1.04 \times 10^{-10}$	0.97	0.08	22.55
	40	$1.37 \times 10^{-10}$	0.99	0.04	7.93
	50	$2.68 \times 10^{-10}$	1.00	0.04	7.00
		<b><math>1.59 \times 10^{-10}</math></b>	<b>0.98</b>	<b>0.08</b>	<b>18.90</b>

El modelo difusivo de la Segunda ley de Fick posee una constante llamada coeficiente de difusión  $D_{ef}$  que según la Tabla 18 no es dependiente de la temperatura, en la hidratación de habas obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.98, un error cuadrático medio (RMSE) de 0.08 y la raíz del error cuadrado medio (MAE%) de 18.90, como observamos el modelo difusivo tiene un buen coeficiente de determinación sin embargo la raíz del error cuadrado medio es bastante mayor al 10%.

En la Figura 18 se muestra el gráfico de los contenidos de agua y el ajuste del modelo difusivo de Segunda ley de Fick en la hidratación a cuatro temperaturas.

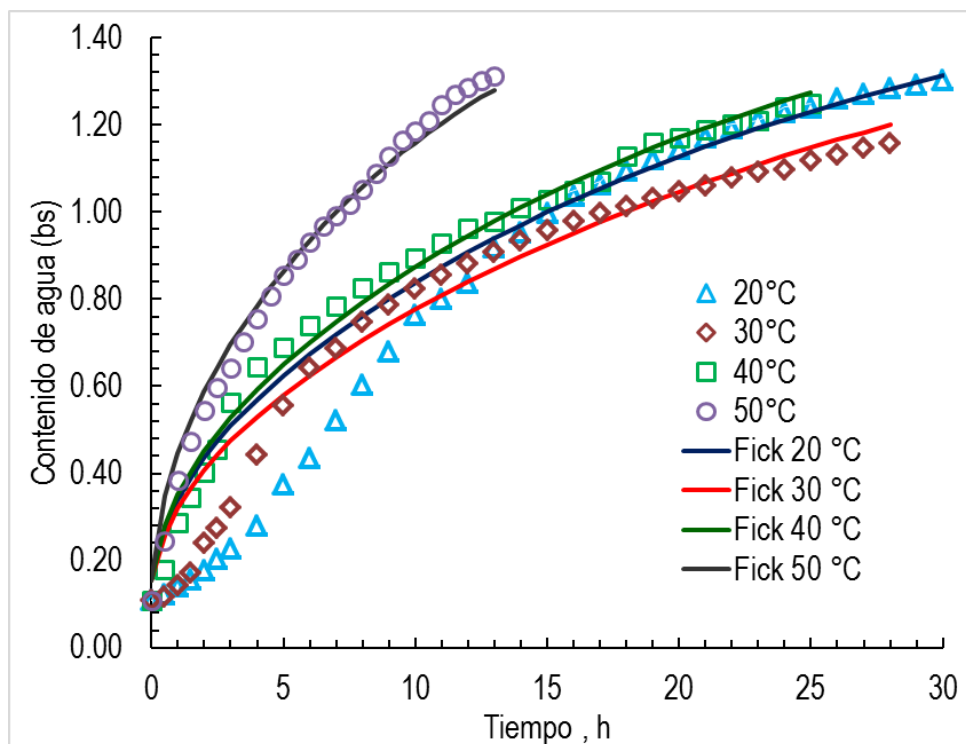


Figura 18. Curvas de hidratación de la ecuación del modelo difusivo de Segunda ley de Fick

En la Figura 18 observamos que en la temperatura de 20°C y 30°C el modelo difusivo ajusta mejor desde el medio hasta el final de curva experimental. Mientras que en

la temperatura de 40°C ajusta en toda la curva y en la temperatura de 50°C ajusta exactamente a la curva experimental con un porcentaje casi nulo de error; por ello podríamos decir que el modelo difusivo se puede usar en la hidratación de habas a altas temperaturas. El modelo de la segunda ley de Segunda ley de Fick (Ecuación 24), puede simplificarse a un término de la serie en tiempos infinitos. En tal sentido, para las cuatro temperaturas, se puede considerar tiempo infinito a partir de las 9 h de hidratación. El error a tiempo infinito de MAE% se reduce de 38.13 a 7.729, considerándose un modelo bueno en la temperatura de 20°C. Se aplicó este modelo también en la hidratación de arroz paddy (Balbitoti, Jorge, & Jorge, 2017) quienes obtuvieron resultados idénticos, explicando mejor que a mayores temperaturas (30°C – 70°C) de hidratación el modelo difusivo ajusta mejor.

#### 4.5. Propiedades termodinámicas

##### 4.5.1. Resultados de energía de activación

La inclinación de la recta en la ecuación de Arrhenius nos permite determinar la energía de activación en la cual usamos también la constante general de los gases ( $R=0.008314KJ/kmol.K$ ). Las figuras 19 y 20 se muestran los gráficos con sus ecuaciones para la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo

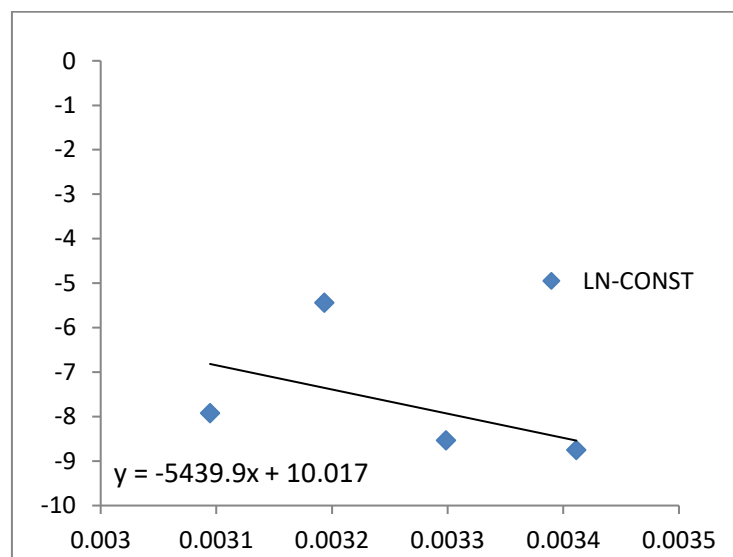


Figura 19: Gráfico de los coeficientes de difusión vs inverso de la temperatura (°K)

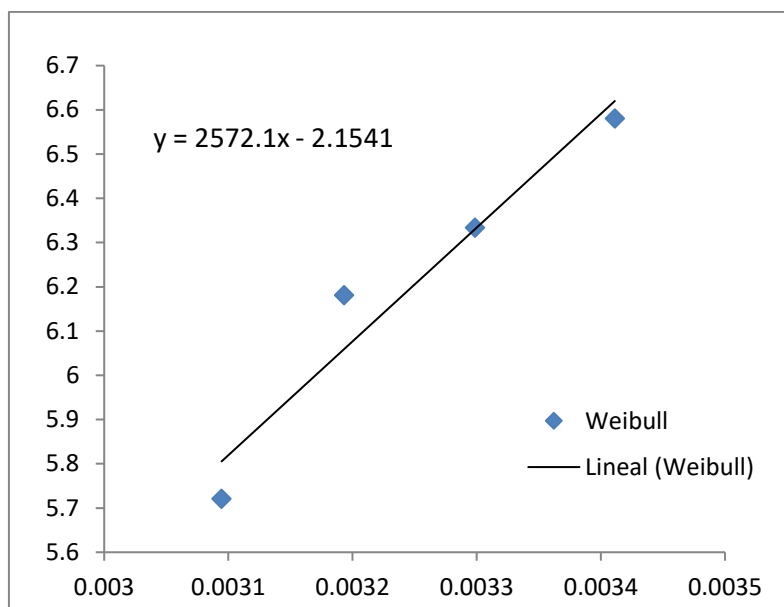


Figura 20: Gráfico de Ln (K) vs inverso de la temperatura ( $^{\circ}K$ )

En base al mejor modelo de ajuste Weibull y la inclinación de la recta en la Figura 19 se halló la energía de activación, el valor estimado de  $E_a$  para la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo fue de 20.9 KJ/mol inferior al obtenido por (Ccopa Mendoza, 2015) de 28.88 KJ/mol en la hidratación de habas, (Mattioda, de Matos Jorge, & Matos Jorge, 2018) de 28.38 KJ/mol en hidratación de trigo, (Addo & Plange, 2009) de 28.38 KJ/mol en hidratación de semillas de melón, (Ulloa, Ulloa, Ramírez Ramírez, & Ulloa Rangel, 2016) de 25.99 KJ/mol en hidratación de frijol Mayacoba, (Sadik, Demelash, & Gizaw, 2013) de 24.59 KJ/mol en hidratación de grano teff, (Pramiu, Rizzi, do Prado, Coelho, & Bassinello, 2015) de 36.040 kJ/mol en hidratación de garbanzo y (Solomón, 2008) de 39.23 y 37.78 KJ/mol en hidratación de tarwi. Esto significa que se necesita menor energía en la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo para lograr hasta la humedad en equilibrio, la energía de activación fue menor en comparación con la hidratación de habas de la misma variedad de (Ccopa Mendoza, 2015), esto podría estar relacionado al contenido de humedad y a la composición química del grano de haba (Montanuci, Matos Jorge, & Matos Jorge, 2015).

A partir del valor de la energía de activación es posible determinar las propiedades termodinámicas de entalpía, entropía y energía libre de gibbs. En la tabla 7 se muestran las propiedades termodinámicas de la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo.

Tabla 18.

*Propiedades termodinámicas de habas de la variedad gigante de Yunguyo*

Modelo	T(C°)	T(K°)	Entalpía (KJ/mol)	Entropía (KJ/mol.K)	Energía libre de Gibbs (KJ/mol)
Weibull	20	286	23.33	-0.417	145.72
	30	284	23.41	-0.417	150.06
	40	276	23.50	-0.418	154.41
	50	276	23.58	-0.418	158.75

En la Tabla 19 observamos que los valores de entalpía incrementan con el aumento de la temperatura de 23.33 KJ/mol a 23.58 KJ/mol, los valores positivos de la entalpía indican que la hidratación de granos de habas está asociada con transformaciones endotérmicas por ello incrementa la entalpía en el sistema ( $\Delta H > 0$ ). Mattioda, de Matos Jorge, & Matos Jorge, (2018) menciona que cuando se trata de hidratación de granos, se almacena una cantidad de energía en las conexiones intermoleculares del grano, pero con la entrada de agua se produce una reorganización de las conexiones y se altera la energía alterada.

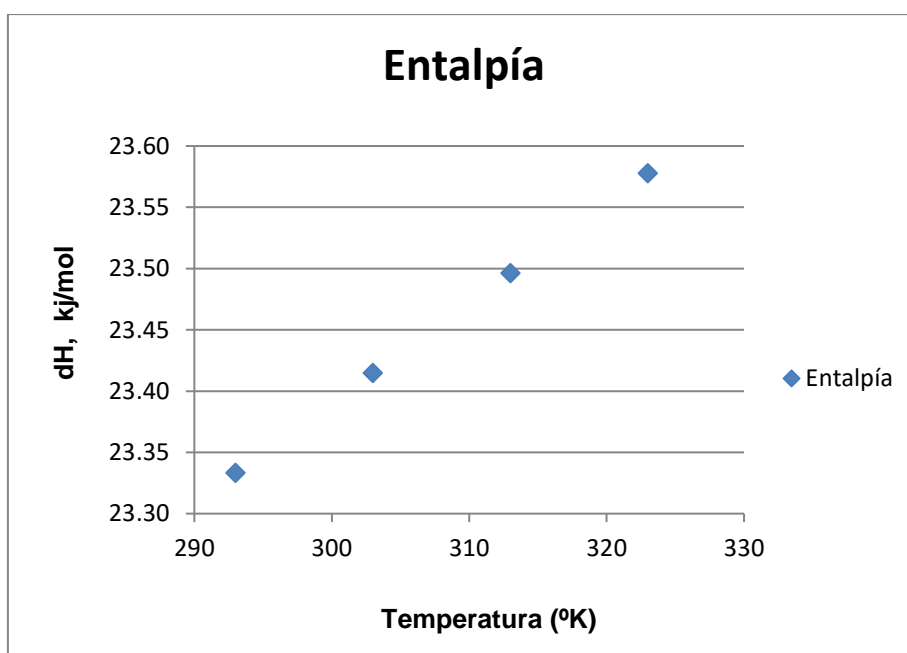


Figura 21. Relación de la temperatura versus la entalpía

En la Figura 21 se observa el incremento de la entalpía con el aumento de la temperatura, esto ya que a mayor temperatura las moléculas se agitan aún más lo que provoca éstas variaciones en la energía y entalpía.

La entropía promedio según la Tabla 19 fue de  $-0.42 \text{ KJ/mol.K}$  valor negativo en la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo, esto indica que el proceso de hidratación se produjo sin un incremento significativo en el trastorno del sistema (Borges, Jorge, & Jorge, 2017), los valores negativos se observaron también en la hidratación de trigo (Mattioda, de Matos Jorge, & Matos Jorge, 2018), soja (Borges, Jorge, & Jorge, 2017), frijoles y garbanzo (Shafaei, Masoumi, & Roshan, 2016) y arroz (Balbitoti, Jorge, & Jorge, 2017).

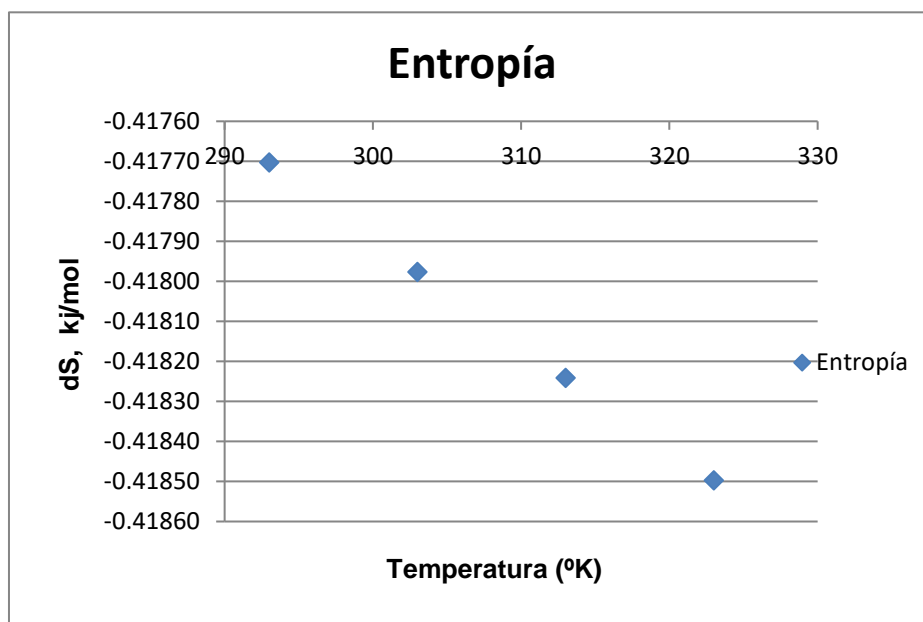


Figura 22: Relación de la temperatura versus la entropía.

Según la Figura 22 la entropía es negativa y disminuye con el incremento de la temperatura, en la Segunda Ley de la Termodinámica si la entropía es cero el fenómeno de hidratación es irreversible, como sucede en la hidratación de habas de la variedad gigante de Yunguyo.

Asimismo según la Tabla 18 la  $\Delta G$  fue de  $152.24 \text{ KJ/mol}$ . Los valores positivos indican que la reacción es espontánea y expresa la absorción de energía del área que rodea el sistema (Shafaei, Masoumi, & Roshan, 2016)

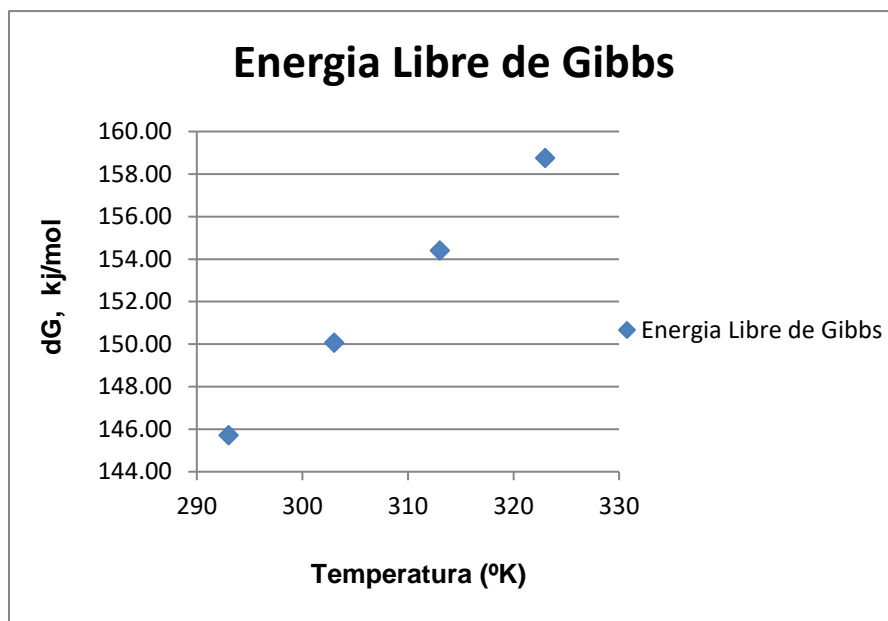


Figura 23: Relación de la temperatura versus la energía libre de Gibbs

En la Figura 21 observamos que a medida que incrementa la temperatura aumenta la energía libre de Gibbs de 154.72KJ7mol a 158.75 kJ/mol, (Oulahna, Hebrard, Cuq, Abecasiss, & Fages, 2012) menciona que el cambio en la  $\Delta G$  normalmente está relacionado a los cambios en la entalpía o entropía y su señal informa sobre la espontaneidad de la reacción. Este fenómeno se observó también en trigo (Mattioda, de Matos Jorge, & Matos Jorge, 2018) en nueces de bambara (Jideani & Mpotokwana, 2009) y en cebada (Montanuci, Matos Jorge, & Matos Jorge, 2015).

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES**

- Se obtuvieron curvas de hidratación a cuatro temperaturas las cuales presentaron influencia en la hidratación de habas.
- Al ajustar los datos experimentales a los modelos fenomenológicos y empíricos, el modelo Weibull presentó el mejor ajuste con una media absoluta porcentual de 4.57.
- Se determinó la velocidad de hidratación la cual aumentó respecto a la temperatura, por ello la hidratación fue más rápida a mayor temperatura.
- El valor estimado para la energía de activación de habas de la variedad gigante de Yunguyo fue de 20.9 KJ/mol. La entalpía, entropía y energía libre de Gibbs mostraron que el proceso de hidratación fue endotérmico.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda hacer isotermas de sorción para hallar humedad en equilibrio.
- Se recomienda hidratar habas secas con diversos años de almacenamiento.

## Referencias

- AACC-American Association of Cereal Chemistry. (2000). *Aproved methods*. Saint Paul, MN: American Association of Cereal Chemistry.
- Aldana de Leon, L.F. (2010). Produccion Comercial y de Semilla de Haba (*Vicia Faba L.*). Manual Tecnico Agricola. Quetzaltenango - Guatemala. ICTA
- Bourges, R.H. (1987). Las Leguminosas en la alimentación humana (Parte 1). Cuadernos de Nutrición, (pp. 17 - 32)
- Balbay, A., Avci, E., Sahin, O., & Coteli, R. (2012). Modeling of drying process of bittim nuts (*Pistacia terebinthus*) in a fixed bed dryer system by using extreme learning machine. *International Journal of Food Engineering*, 8(4), 18.
- Charan, V. D., & Prasad, S. (1996). Kinetics of absorption of wáter by maize. *Journal of Food Science and Technology*, 33(5), 383–388.
- Cerón, A.F., Osorio, O., Garcés, L.F., (2016). Processing of Peas (*Pisum Sativum L.*) Part. 2: Kinetics of Absorption of Water in Pea Seeds, varieties San Isido and Sureña. *Información Tecnológica*. Vol 27 N<sup>a</sup> 1. 81-90.
- Coutinho, M.R., Omoto, E.S., Andrade, M.G., Jorge, L.M.M., (2005). *Ciencia Tecnologia Alimentaria Campinas* 25(3) 603-610.
- Coutinho, M. R., Omoto, E. S., Conceição, W. A. D. S., Andrade, C. M. G., & Jorge, L. M. D. M. (2009). Modeling of the soybean grains hydration by a distributed parameters approach. *International Journal of Food Engineering*, 5(3).
- Crank, J. (1975). *Mathematic of Diffusion*. Oxford, USA (2nd ed.). London.
- CreMASCO, M. A. (1998). *Fundamentos de transferência de massa*. Campinas - SP, Brasil: Editora da Universidade Estadual de Campinas.
- Cronquist, A. (1991). *Introducción a la Botánica*. Compañía Editorial Continental. S.A.México. 2da Edición.



- Fan, L. T., Chen, H. C., Shellenberger, J. A., & Chung, D. S. (1965). Comparison of the rates of absorption of water by corn kernels with and without dissolved sulfur dioxide. *Cereal Chemistry*, 42(385-396).
- Fracasso, A.F., Perussello, C.A., Haminiuk, C.W.I., Jorge, L.M.M., Jorge, R.M.M., (2014). Cinética de Hidratación de la soja: Cultivares transgénicos y Convencionales. *Journal of Cereal Science. Brasil*. (pp. 584-588).
- González, J. A., Gallardo, M., Hilal, M., Rosa, M., & Fernando, E. (2009). Physiological responses of quinoa ( *Chenopodium quinoa* Willd .) to drought and waterlogging stresses : dry matter partitioning. *Botanical Studies*, 50, 35–42.
- Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J. (2007). Influence of pre-blanching on the water absorption kinetics of soybeans. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 810–819.
- Haros, M., Viollaz, P. E., & Suarez, C. (1995). Effect of temperature and SO<sub>2</sub> on the rates of water absorption of three maize hybrids. *Journal of Food Engineering*, 25(4), 473–482. [http://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00022-2](http://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00022-2)
- Jideani, V.A & Mpotokwana, S.M. (2009). Modelling of water absorption of Botswana Bambara varietis using Peleg`s equation. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 182 - 188.
- Jideani, V.A., Nkama, I., Agbo, E.B., Jideani, I.A. 2002. Mathematical modeling of odor deterioration of milley (*Pennisetum glaucum*) dough (fura) as affected by time-temperature and product packaging parameters. *Cereal Chemistry* 79(5), 710 - 714.
- Kadam, S.S., Deshpande, S.S., Jambhale, N.D. (1989). Seed structure and composition. En; *Handbook of World Food Legumes: Nutritional Chemistry, Processing Technology and Utilitation*. Vol. I. Salunkhe, D.K., Kadam, S.S. (Ed.) CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU, 189 - 193.
- Kaur, K., & Singh, A. K. (2014). Drying kinetics and quality characteristics of beetroot slices under hot air followed by microwave finish drying. *African Journal of Agricultural Research*, 9(12), 1036–1044. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013>.

- Keqing, X. (2004). Optimización del Secado por Aire caliente de pera (Variedad Blanquilla). Universidad Politecnica de Valencia. Valencia. (pp.40)
- Khazaei, J., & Mohammadi, N. (2009). Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Food Engineering*, 91(4), 542–552.
- Kumar, M.M., Prasad, K, Chandra, T.S., Denbnaht, S., (2018). Evaluación de las propiedades físicas y cinética de hidratación de lentejas rojas (*lens Culinaris*) a diferentes niveles procesados y temperaturas de remojo. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. India. (pp. 330-338)
- Lewis, W.K. (1921). The rate of drying solid materials. *J. Ind. Eng. Chem.* 13 (5): 427-432.
- Lopes Filho, J. F., Pumacahua-Ramos, A., & Telis-Romero, J. (2006). Difusividades da Água , Dióxido de Enxofre e Ácido Láctico em Grãos de Milho Durante a Maceração para o Processo de Moagem Úmida Water , Sulfur Dioxide and Lactic Acid Difusivities in Corn Grains During Steeping for Wet Milling. *Brazilian Journal of Food Technology*, 9(4), 257–263. Retrieved from <http://www.ital.sp.gov.br/bj/artigos/html/busca/PDF/v9n4258a.pdf>
- Lopes Filho, J. F., Ramos, A. P., & Telis-Romero, J. (2006). Water, sulfur dioxide and lactic acid difusivities in corn grains during steeping for wet milling. *Brazilian Journal of Food Technology*, 9(4), 257–263.
- López, L. (1993). The role of legumes crop in sustainable agriculture. The case of lupine. *Advances in Lupin Research. Agronomy & Production* (pp. 272 - 289).
- Maldonado, S., Amaru, E., Bertuzzi, M.A., (2010) Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering* 96. pag 333-341. Argentina
- Maskan, M. (2002). Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 337–341.

- Mendes, B. F. (2009). *Absorção de água por grãos de milho com diferentes níveis de danificação mecânica*. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais - Brasil.
- Mircea Oroian, (2017). The temperature hydration kinetics of *Lens culinaris*. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 16, 250-256.
- Moreno, M.T. (1983). Las leguminosas de grano: una vision de conjunto. En: *Leguminosas de Grano*. Cubero J.I.
- Oliveira, A. L., Colnaghi, B. G., Silva, E. Z. Da, Gouvêa, I. R., Vieira, R. L., & Augusto, P. E. D. (2013). Modelling the effect of temperature on the hydration kinetic of adzuki beans (*Vigna angularis*). *Journal of Food Engineering*, 118(4), 417–420. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877413002240>
- Omoto, E. S., Marcos, C., Andrade, G., Maria, R., Jorge, M., Coutinho, M. R., ... Jorge, D. M. (2009). Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha. Mathematical modeling and analysis of pea grains hydration. *Ciência E Tecnologia de Alimentos*, 20(1), 12–18.
- Peleg, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *Journal Food Engineering*, 53(4), 1216–1217 e 1219.
- 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(4), 447–452.
- Pramiu, P.V., Rizzi, R.L., Coelho, S.R.M., Bassinello, P.Z.. (2015). Numerical modeling of chickpea (*Cicer arietinum*) hydration: The effects of temperature and low pressure. *Journal of Food Engineering*. 165 (112-123).
- Prasad, K., Vairagar, P. R., & Bera, M. B. (2010). Temperature dependent hydration kinetics of *Cicer arietinum* splits. *Food Research International*, 43, 483 – 488.
- Pumacahua, A. (2011). Estudio de la Absorción de agua de cuatro variedades de Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) en el proceso de molienda húmeda. Lima. (pp. 6)

- Pumacahua-Ramos, A., Lópes Filho, J. F., Rocha, O. C. M., & Limaylla-Guerrero, K. M. (2012, November). Maceração de quinoa e modelagem matemática. *III Simposio de Engenharia E Cinência de Alimentos*, p. E7. São José do Rio Preto - SP.
- Quispe, M. (2011). Experiencia en Promoción de Cadena Productiva Menestras Haba y Posibilidad de Exportación. Direccion Regional Agraria Puno. Yunguyo. Puno.
- Repo-Carrasco, R., Espinoza, C., & Jacobsen, S. E. (2003). Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Reviews International*, 19(1-2), 179–189. <http://doi.org/10.1081/FRI-120018884>
- Resende, O., & Corrêa, C. (2007). Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão. *Acta Sci. Agron.*, 29(3), 373–378.
- Reyes, M., Gómez, I., Espinoza, C., Bravo, F., Ganaza, L. Tablas Peruanas de Composicion de Alimentos. (2009).. 8° Ed. Ministerio de Salud, Instituto Nacional de Salud.
- Resio, C. N., Aguerre, R. J., & Suarez, C. (2006). Hydration kinetics of amaranth grain. *Journal of Food Engineering*, 72(3), 247–253.
- Resio, C. N., Aguerre, R. J., & Suárez, C. (2003). Study of some factors affecting water absorption by amaranth grain during soaking. *Journal of Food Engineering*, 60(4), 391–396.
- Sadik, J.A., Demelash, Biresaw, Gizaw, Mengistu. (2013). Hydration kinetics of teff grain. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, Vol 15 Nro 1, 124-130.
- Sharanagat, V.S, Kansal, V, Kumar, Kshitiz (2018). Modeling the effect of temperature on the hydration kinetic whole moong grain. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 17, 268-274.
- Shafaei, S.M., Masoumi, A.A., Roshan, H. (2016). Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 15, 135-144

- Sharaf-Eldeen, Y.I., Hamdy, M.Y., Blaisdell, J.L. (1979). Falling rate drying of fully exposed biological materials. A review of mathematical models. American Soc. of Agric. Eng. Paper No. 79-6522
- Singh, B.P.N.; Kulshrestha, S.P. (1987). Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. *Journal of Food Science*, v. 52, n. 6, p. 1538-1542 e 1544
- Siqueira, V.C., Resende, O., Chaves, T.H., (2012). Drying kinetics of Jatropha seeds. *Rev.Ceres* 59, 171-177.
- Solomon, W. K. (2009). Hydration kinetics of roasted lupin ( *Lupinus Albus* ) Seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33, 214–225.
- Sopade, P. A., & Obekpa, J. A. (1990). Modelling Water Absorption in Soybean, Cowpea and Peanuts at Three Temperatures Using Peleg's Equation. *Journal of Food Science*, 55(4), 1084–1087. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01604.x>
- Sopade, P. A., Xun, P. Y., Halley, P. J., & Hardin, M. (2007). Equivalence of the Peleg, Pilosof and Singh–Kulshrestha models for water absorption in food. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 730–734. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.10.007
- Suquilanda, M. (1984). Cultivos asociados en el Ecuador: una experiencia IV Congreso Internacional de Cultivos Andinos. Centro Regional de Investigaciones. Obonuco, Pasto, ICA. (pp. 79 - 80).
- Torija, M.E. y Díez, C. (1999). Legumbres. En: Tratado de nutrición, Hernández M., Sastre A. (Ed), Ediciones Diaz de Santos, Madrid, España. (pp. 425-429)
- Tunde-Akintunde, T. Y. (2010). Water Absorption Characteristics of Nigerian Acha (*Digitaria exilis*). *International Journal of Food Engineering*, 6(5), 11.
- Vidal, D., Maupoey, P. & Tarraza, J. (1986). La actividad de agua en alimentos. *Alimentación. Equipos y Tecnología*, 5 (37).
- Yaldyz, O., & Ertekyn, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19(3), 13.

Zulet, M.A. y Martínez, J.A. (2001). Dieta Mediterránea: legumbres y colesterolemia. Rev. Chile. Nutrición. (pp. 312 - 320)

## ANEXOS

### Anexo 1. Procedimiento para determinación de masa y densidad real

#### Masa

Para la determinación de masa, los granos de habas fueron pesados en balanza electrónica de precisión (0.001g).

#### Densidad Real

Se determina dividiendo la masa (g) entre el volumen (ml) desplazado en la probeta.

$$\rho = \frac{m}{V} * 1000 \quad (\text{kg/m}^3)$$

## **Anexo 2. Procedimiento de aplicación de Solver en Excel 2010**

Solver es un programa de complemento de Microsoft Excel que puede usar para llevar a cabo análisis y si. Use Solver para encontrar un valor óptimo (mínimo o máximo) para una fórmula en una celda, la celda objetivo, que está sujeta a restricciones o limitaciones en los valores de otras celdas de fórmula de una hoja de cálculo. En resumidas cuentas, puede usar Solver para determinar el valor máximo o mínimo de una celda cambiando otras celdas.

En el presente trabajo se aplicó la herramienta Solver para ajustar la curva experimental a las curvas de los modelos matemáticos. Para lo cual se necesita activar la herramienta en el Excel.

- Se grafica primero las curvas experimentales versus la curva del modelo
- Se selecciona la curva experimental
- En barra de menús cliquear en Datos - Solver
- El solver nos pide escoger la celda a optimizar (minimizar o maximizar)
- Escoger celda a minimizar
- Aceptar

Se usó Solver en todos gráficos con la finalidad de optimizar las curvas experimentales.