

“Madre de Dios Capital de la Biodiversidad del Perú”
**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA
AGROINDUSTRIAL**

**“ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA HARINA DE
CASTAÑA (*Bertholletia excelsa h.b.k*) EN LA REGIÓN DE
MADRE DE DIOS.”**

TESISTA:

Bach. BRUNO YURI HUAMAN YUCA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

PUERTO MALDONADO – PERÚ

2016

“Madre de Dios Capital de la Biodiversidad del Perú”

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA
AGROINDUSTRIAL**

**“ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA HARINA DE
CASTAÑA (*Bertholletia excelsa h.b.k*) EN LA REGIÓN DE
MADRE DE DIOS.”**

TESISTA:

Bach. BRUNO YURI HUAMAN YUCA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

PUERTO MALDONADO – PERÚ

2016

“Madre de Dios Capital de la Biodiversidad del Perú”

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL**

TÍTULO DE TESIS:

**“ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA HARINA DE
CASTAÑA (*Bertholletia excelsa h.b.k*) EN LA REGIÓN DE
MADRE DE DIOS.”**

Para Optar el título profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Presentado por:

Bach. BRUNO YURI HUAMAN YUCA

PUERTO MALDONADO– PERÚ

2016

DEDICATORIA

En momentos de dificultad, de felicidad, de inseguridad, de confianza, de pesimismo y optimismo, siempre estuviste ahí, siempre fuiste el primero en saber todo lo que pasaba por mi mente y cuan complicado y lleno de obstáculos era el camino. Por haberme permitido culminar esta investigación, aportar algún conocimiento con ello y lograr otra meta más en mi vida. Siempre me brindaste ánimo y consuelo y encontré en ti una salida a todos los problemas que se presentaron, gracias Dios, gracias Señor por siempre estar ahí.

A mi mamá **Ricardina Yuca Gómez** en especial, por su dedicación, amor y sacrificio abnegado a lo largo de estos años hacia mi persona.

A mi padre **Gregorio Huamán Mamani** por su apoyo para lograr alcanzar mis sueños.

A mi hermano **Gregorio Huamán Yuca** por todo lo que vivimos juntos por esos grandes momentos de alegría juntos y también por aquellos momentos de tristeza que pasamos, sin olvidar jamás todo tu apoyo y afecto que nos tenemos como hermanos la cual perdurara por siempre, por tus consejos y también por tu bromas aunque un poco burlonas pero me hacen reír.

A mi hermano **Daniel Huamán Yuca** por todo lo vivido juntos por soportar mi carácter por todo tu apoyo ya que demostraste ser un padre más para mí por todo tu apoyo mientras estudiaba en la universidad te sacrificaste más de lo que debiste y todo lo hiciste sin esperar nada a cambio gracias hermano por enseñarme a ser una persona más bondadosa ello nunca lo olvidare jamás.

A mi cuñada **Eva Marca Carrasco** por su amistad y apoyo.

A mis sobrinos **Daniel Manuel Huamán Marca** y **Úrsula Huamán Marca** por compartir momentos muy bonitos conmigo.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Javier Díaz Viteri, por el asesoramiento de este trabajo de investigación.

Al Ing. Palmer Vicente Pulla Huillca, por el co-asesoramiento de este trabajo de investigación.

Al Ing. Justino Ovalle Focori. Por su apoyo sin el cual no hubiera sido posible la culminación del presente trabajo de investigación por su amistad y compañeros que fuimos cuando estudiábamos en la Universidad el cual guardo con enorme gratitud.

A mi amiga Wendi Cueva Cueto por todo su apoyo por involucrarse en este trabajo de investigación sin su apoyo no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

A mi amigo Pedro Nascimento Herbay por su consejo y a la gran amistad que nos tenemos.

A mi amigo Aldo Cesar Espirilla por su aporte en la presente tesis y a la gran amistad que nos tenemos.

A mi amiga Ambar Arevalo Navarro por su apoyo brindado por su amistad, palabras de aliento y ocurrencias que me hacían reír.

A mis compañeros de la Universidad Justino Ovalle, Aldo Herrera, Johan Mosqueira, Pedro Nascimento, Guisela Galindo Pacherras, Ruth Murillo, Juliana Alvarez, Sergio Conto, Delsy Pizango, Liz Caceres, Ediht Huampa, Lidia Higuera, Grinly Diaz, Linda Balarezo, Juana Villagra, Carmen Nascimento. Elvis Villaverde, Al Consorcio de la UNAMAD por el financiamiento en la presente tesis.

A todos mis profesores que me ayudaron en mi formación profesional

A mis compañeros de trabajo de la empresa Manutata S.A.C por su amistad, comprensión y confianza depositada en mi persona.

A todas las personas que me apoyaron de manera directa e indirecta en el presente trabajo de investigación.

PRESENTACION

La tesis elaborada tiene la intención de proporcionar información sobre las isotermas de adsorción de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) a diferentes temperaturas y actividades de agua (a_w) (Humedades relativas), con la finalidad de evaluar y encontrar sus condiciones adecuadas de almacenamiento, lo cual asegure su mayor estabilidad.

La tesis de investigación consta de tres capítulos.

CAPITULO I: Marco teórico, que señala los antecedentes, la revisión Bibliográfica y la investigación bibliográfica.

CAPITULO II: MATERIALES Y METODOS, puntualiza las diversidades, materiales, Materiales de Preparación del Fruto, Materiales de laboratorio, Equipos y Reactivos. Los Métodos, la metodología, los materiales empleados para el presente trabajo.

CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES, indica las imágenes y gráficos las que se indican en los resultados que se ha determinado de la aplicación de los instrumentos de investigación así como los resultados

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	VI
INDICE DE FIGURAS	VII
NOMENCLATURA	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCION	1
CAPITULO I.....	5
MARCO TEORICO	5
1.1. ANTECEDENTES	5
1.2. GENERALIDADES DE LA CASTAÑA (<i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K).....	9
1.2.1. CLASIFICACION TAXONOMICA.....	10
1.2.2. ECOLOGIA.....	10
1.2.3. VALOR NUTRICIONAL	12
1.3. USO Y POTENCIAL COMERCIAL.....	13
1.4. EL AGUA EN LOS ALIMENTOS.....	14
1.5. ACTIVIDAD DEL AGUA	15
1.6. ISOTERMA DE SORCION.....	16
1.6.2. INTERES DE LAS ISOTERMAS DE SORCION PARA LA TECNOLOGIA ALIMENTARIA	19
1.6.3. CLASIFICACION DE LAS ISOTERMAS DE SORCION	21
1.6.4. ADSORCION	22
1.6.5. FACTORES EN LA ADSORCIÓN:.....	22
1.6.6. MODELOS MATEMATICOS PARA LAS ISOTERMAS DE SORCION.....	26
1.6.6.1. Modelo de BET - Brunauer, Emmet y Teller (1938)	26
1.6.6.2. Modelo de GAB – Guggenheim, Anderson y De Boer (1984).	27
1.6.6.3. Modelo de Halsey (1948)	28
1.6.6.4. Modelo de Oswin (1946)	28
1.6.6.5. Modelo de Henderson.....	29
1.6.7. CALIDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMATICOS.....	29
1.6.8. METODOS DE MEDICION DE ISOTERMAS DE SORCION	30
1.7. CALOR ISOSTERICO DE SORCION	31
1.8. ENERGIA DE ACTIVACION.....	34
1.9. ALMACENAMIENTO	35
1.9.1. FACTORES QUE ALTERAN LOS ALIMENTOS ALMACENADOS.....	35
CAPITULO II.....	38
MATERIALES Y METODOS	38

2.1. LUGAR DE EJECUCION	38
2.2. MATERIALES.....	38
2.2.1. Materia prima.....	38
2.2.2. Reactivos (Sales).....	38
2.2.3. Equipos de laboratorio.	39
2.2.4. Materiales	39
2.2.5. Soluciones químicas de desinfeccion	40
2.2.6. Caracterización de la materia prima.....	40
Castaña y sus respectivas normas de determinación	40
2.2.7. Flujograma para la obtención de la harina de castaña.....	41
2.2.8. Acondicionamiento de lá muestra.....	42
2.2.9. Isotermas de adsorción	44
2.2.10. Determinación de la humedad de equilibrio (X_e)	46
2.2.11. Ajuste matemático de las isotermas de adsorción	47
2.2.12. Determinación de la monocapa del modelo de GAB	48
2.2.13. Determinación del calor isostérico de adsorción (q_{st}).....	48
2.2.14. Determinación de la energía de activación (E_a)	49
CAPITULO III.....	50
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	50
3.1. ANALISIS FISICOQUIMICO	50
3.2. .HUMEDAD DE EQUILIBRIO	50
3.3. ISOTERMAS DE ADSORCION	52
3.4. AJUSTE DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCION	53
3.5. CALOR ISOSTERICO DE ADSORCION	63
3.6. ENERGIA DE ACTIVACIÓN.....	67
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFIA.....	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 01: Composición nutricional de castaña amazónica (en 100 g).....	12
Tabla 02: Métodos para la determinación de las isotermas de sorción.	31
Tabla 03: Tolerancia a la temperatura de los microorganismos.	36
Tabla 04: Tipos de análisis fisicoquímicos realizados en la harina de.....	40
Tabla 05: Variación de las humedades relativas de equilibrio (%) en función de las tres temperaturas utilizadas en el experimento.	44
Tabla 06: Sales y ecuaciones utilizadas para obtener la a_w o humedad relativa (%) a una temperatura ($^{\circ}$ K) determinada.....	45
Tabla 07: Cantidad de sal y agua recomendadas para la preparación de Soluciones salinas saturadas.	46
Tabla 08: Composición fisicoquímica de la harina de castaña (<i>Bertholletia excesa</i> H.B.K).....	50
Tabla 09: Valores de humedad de equilibrio, x_e (g agua/g m.s.) experimental de las muestras secas de harina de castaña en función de la actividad del agua (a_w) a las temperaturas de estudio.	51
Tabla 10. Parámetros de ajuste de las isotermas de adsorción de la harina de castaña para los diferentes modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), desvío porcentual medio (P), error estándar de humedad (SEM) y distribución de los residuos, a la temperatura de 30° C.	54
Tabla 11. Parámetros de ajuste de las isotermas de adsorción de la harina de castaña para los diferentes modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), desvío porcentual medio (P), error estándar de humedad (SEM) y distribución de los residuos, a la temperatura de 40° C.	55
Tabla 12. Parámetros de ajuste de las isotermas de adsorción de la harina de castaña para los diferentes modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), desvío porcentual medio (P), error estándar de humedad (SEM) y distribución de los residuos, a la temperatura de 50° C.	56
Tabla 13: Calor isostérico de adsorción (q_{st}) de la harina de castaña a diferentes valores de humedad de equilibrio.	64
Tabla 14: Parametros Q_0 y X_0 y coeficiente de determinación (R^2)ajustado de la ecuación de Tsami et al. (1990).....	66
Tabla 15. Parámetros del modelo de GAB a las diferentes temperaturas de evaluación.	67
Tabla 16: Energía de activación de los parámetros termodinámicos del modelo de GAB.	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 01: A: Árbol de castaña; B: Castaña en cascara; C: Longitud de la castaña; D: Partes de la castaña.	11
Figura 02: Isoterma de adsorción	17
Figura 03: Los cinco tipos de Isotermas.	21
Figura 04: Relación de Clausius – Clapeyron para distintos contenidos de humedad.	33
Figura 05: Obtención de la harina de castaña.	41
Figura 06: Muestra de harina de castaña almacenada en envase de vidrio cubierto con bolsa luminizada.	43
Figura 07: Diagrama de flujo para la determinación de las isotermas de adsorción de la harina de castaña	49
Figura 08: Isotermas de adsorción para la harina de castaña (<i>Bertholletia excelsa H.B.K</i>) a las temperaturas de estudio.	53
Figura 09: Isotermas de adsorción ajustadas mediante el modelo de GAB a las tres temperaturas de estudio.	59
Figura 10: Isotermas de adsorción ajustadas mediante el modelo de HALSEY a las tres temperaturas de estudio.....	60
Figura 11: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos indicados para la harina de castaña a la temperatura de 30°C	60
Figura 12: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos indicados para la harina de castaña a la temperatura de 40°C	61
Figura 13: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos indicados para la harina de castaña a la temperatura de 50°C	61
Figura 14: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos GAB y HALSEY para la harina de castaña a la temperatura de 30°C	62
Figura 15: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos GAB y HALSEY para la harina de castaña a la temperatura de 40°C	62
Figura 16: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos GAB y HALSEY para la harina de castaña a la temperatura de 50°C	63
Figura 17: Curvas de $-\ln(a_w)$ versus $1/T$ a diferentes humedades de equilibrio para la harina de castaña.	64
Figura 18: Influencia de la humedad de equilibrio (X_e) en el calor de adsorción (q_{st}) para la harina de castaña.	65

NOMENCLATURA

Q_{ST}	=	Calor isotérmico total de sorción (kJ/mol).
q_{st}	=	Calor isotérmico neto de sorción (kJ/mol).
λ	=	Calor de vaporización del agua pura (kJ/mol).
q_o	=	Calor esotérico de sorción de la primera molécula de agua kJ/mol).
X_o	=	Contenido de humedad inicial del material alimenticio (g agua/g.m.s.).
D	=	Constante en estudio.
D_o	=	Factor de arrhennius.
E_a	=	Energía de activación (kJ/mol)
m_s	=	Masa de la muestra seca (g).
b.s	=	Base seca.
R²	=	Coefficiente de determinación.
A_w	=	Actividad de agua.
f	=	Fugacidad de la solución.
f_o	=	Fugacidad del solvente puro.
P	=	Presión parcial de vapor de agua en el sistema.
HRE	=	Humedad relativa de equilibrio.
X_e	=	Humedad de medida “(g agua/ g.m.s.)”.
X_m	=	Humedad de la monocapa “(g agua/g.m.s.)”.
C_{BET}	=	Invariable de BET relacionada al calor de sorción.
C_{GAB}	=	Constante de Guggenheim, característica del fruto y relacionado con el calor de adsorción de la monocapa.
K_{GAB}	=	Factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

- A y B** = Constantes características de las ecuaciones que penden de la temperatura y propiedades del fruto.
- R** = Constante universal de los gases “8,314kJ kmol⁻¹K⁻¹”.
- T** = Temperatura dominante (°K).
- k y n** = Constantes características de la ecuación que penden del clima y propiedades del fruto.
- P** = Desvió porcentual medio (%).
- SEM** = Error estándar medio (%).
- N** = Número de puntos experimentales.
- n** = Numero de constantes en el modelo.
- X_{el}** = Contenido de saturación de medida empírica “(g agua/ g.m.s.)”.
- X_{cl}** = Contenido de humedad de medida deducida a partir de cada muestra “(g agua/g.m.s.)”.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo la obtención de las isothermas de adsorción de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) en la región de Madre de Dios. Las isothermas fueron determinadas a las temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C, a través del método gravimétrico estático, con soluciones salinas saturadas en un género de actividades de agua (a_w) de 0.11 a 0.85. Las curvas de adsorción de la harina de castaña exhibieron un comportamiento del tipo III. Se prestó atención cuando la humedad de medida (X_e) se reduce debido al aumento del clima para una determinada a_w , semejante a la mayoría de los productos agrícolas. Los datos experimentales (X_e en función de la a_w) fueron ajustados a cinco modelos de isothermas comúnmente aplicados en alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, Henderson). Según los parámetros estadísticos de análisis, los modelos de Halsey y GAB presentan un mejor ajuste al comportamiento experimental de adsorción de la harina de castaña, exhibiendo valores de coeficiente de determinación R^2 superiores al 97%, desvió porcentual medio P menores del 10%, errores estimados de humedad SEM inferiores a 0.022 y una distribución aleatoria de los excedentes.

La humedad de la monocapa X_m del modelo de GAB ostento obediencia del clima, de 0.0720 a 0.9820 g agua/g m.s., en un rango de temperatura de 30°C a 50°C. A instruir al modelo de Halsey se dedujo los productos de X_e y a_w para conseguir los valores del calor isostérico de adsorción (q_{st}), calculados utilizando la igualdad de Clausius-Clapeyron, observándose que los valores q_{st} reduciendo con el incremento del contenido de humedad de la harina de castaña, reduciendo de -8,0550 a -8,5500 kJ/mol para humedades de 0.0679 g agua/g m.s. a 0.1571 g agua/g m.s. respectivamente en el rango de temperaturas estudiadas. Así mismo, a través de la energía de activación E_a proveniente de la ecuación de Arrhenius, se evaluó la dependencia de los parámetros termodinámicos del modelo de GAB (X_m , C_{GAB} , K_{GAB}) con la temperatura, observándose su influencia en los parámetros de X_m y K_{GAB} con valores de E_a de 12,0163 kJ/mol y -5,6722 kJ/mol respectivamente.

ABSTRACT

The present work aimed to obtain the adsorption isotherms of harina Brasil nuz ((*Bertholletia excelsa* H.B. K). The isotherms were determined at temperatures of 30°C, 40°C and 50°C, through the static gravimetric method with saturated salt solutions in a range of water activities (a_w) from 0.11 to 0.85. The curves of adsorption of adsorption of dried pepper exhibited type III behavior, characteristic of materials. It was noted that the equilibrium moisture content (X_e) decreases with increasing temperature for a given a_w , like most agricultural products. The experimental data (X_e as a function of a_w) were fitted to five isotherm models commonly applied in food (BET, GAB, Halsey, Oswin and Henderson). According to the statistical parameters of analysis, Halsey and GAB models were the best fit to experimental adsorption behavior of dried pepper, with values of coefficient of determination R^2 above 97%, average percentage deviation (P) of less than 10%, estimates error of moisture (SEM) below 0.022 and a random distribution of residuals.

The monolayer moisture X_m of GAB model presented temperature dependence, decreasing from 0.0720 a 0.9820 g water/g dry matter in a temperature range of 30°C, to 50°C. From Halsey model was calculated values for X_e and a_w to obtain the values of isosteric heat of adsorption (q_{st}), calculated using the Clausius-Clapeyron equation, noting that q_{st} values decrease with increasing moisture content of the dried pepper, down from 8,0550 a -8,5500 kJ/mol for moisture of 0.0679 g water/g dry matter. a 0.1571 g water/g dry matter respectively in the temperature range studied. Also, through the activation energy (E_a) from the Arrhenius equation, was evaluated the dependence of thermodynamic parameters of GAB model (X_m , C_{GAB} , K_{GAB}) with temperature, showing its influence on the parameters X_m and K_{GAB} , with E_a values of 12,0163 kJ/mol and -5,6722 kJ/mol respectively.

INTRODUCCION

La castaña es uno de los alimentos más importantes en las zonas tropicales que se cosecha especialmente en el departamento de madre de dios que tiene una gran fuente de recursos naturales la cual es calificada como una eco-región esto se debe a que sus recursos fueron muy poco alterado donde las actividades como caza y la pesca han sido acciones sustanciales para el desarrollo de sus habitantes la riqueza flora y fauna es asombrosa donde destacan la castaña, moena, cedro, palmera, capirona y demas **(Arana et al.,2002)**.

Las diferentes etapas en el procesamiento de la castaña (*Bertholletia excelsa H.B. K*) es de gran importancia social, económica y culturalmente en el departamento de Madre de Dios, la cual intervienen entre 15,000 y 20,000 personas, abarcando 6,500 familias cuyos ingresos provienen de las diferentes etapas en el procesamiento de castaña **(Campos, 2006)**.

Durante el almacenamiento, los alimentos deshidratados incrementan su humedad hasta llegar a un límite de aceptación que pertenece a una actividad de agua (a_w) critica; a partir de la cual el producto manifiesta un deterioro que puede ser físico, químico o microbiológico, el cual provoca una disminución de su calidad y vida útil.

La obtención de harinas es un proceso sencillo y de bajo costo que permite conseguir productos con mejores características de acopio, ya que cuando se separa la mayor cantidad de agua, se disminuye también la actividad líquida lo que lo que prolonga su vida útil a temperatura ambiente en el empaque adecuado y siendo además una de las características más importantes del proceso para la elaboración de harinas a partir de la castaña, no requiere de algún sistema de conservación, puede aprovechar con el excedente de producción, permite la utilización de la nuez de rechazo, puede contribuir en la oferta y precio de la materia prima. **(Madrigal et al., 2006)**.

La muestra de harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) que se utilizo fue la más representativa, homogénea, uniforme, tomando en consideración sus

características organolépticas (color, textura, tamaño) para luego proceder a una operación unitaria para transformar en harina de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.)

El movimiento de agua (a_w) es una medida que muestra el medio de agua en un alimento para que puedan llevarse a cabo resistencias a químicas, bioquímicas (por ejemplo enmohecimiento de lípidos, resistencias enzimáticas, resistencia de Maillard) y progreso microbiano (**Comaposada et al., 2000**, citado por **Vega et al., 2006**). Por lo tanto la actividad de agua es una medida mucho más usada para determinar vida de anaquel del alimento.

Las isotermas de sorción de humedad tienen características fundamentales en algunos productos nutritivos, esenciales para los procesos de secado y en relación con casi todos los aspectos de la estabilidad de almacenamiento, de productos secos o de productos de baja humedad. El comportamiento de las isotermas sorción es también necesario para conocer su relación con las características físicas, química y de la estabilidad de los productos deshidratados y parcialmente deshidratados. (**Hubinger et al., 2009**).

Se conoce una variada bibliografía disponible a nivel mundial sobre isotermas de adsorción de diversos productos agrícolas a diferentes temperaturas y actividades de agua a_w pero también se ha constatado que en nuestro país son escasas las investigaciones acerca de isotermas de adsorción en productos secos con fines de almacenamiento.

La utilidad de las ecuaciones para fijar isotermas de sorción de agua en alimentos y/o productos relacionados, radica en que proporcionan información fundamental para la óptima conservación de los alimentos por deshidratación, es decir, una isoterma puede ayudar a estimar “el tiempo de secado de un alimento, el tiempo de vida en anaquel de productos deshidratados y empacados en materiales adecuados, las condiciones de equilibrio antes de mezclar productos con varias actividades de agua” (**Viccina, 2006**). Asimismo “las isotermas (ecuaciones) son

necesarias para evaluar las funciones termodinámicas del agua sorbida en alimentos". **Matos (1992)**, citado por **(Viccina, 2006)**.

Por tal razón, la presente investigación se planificó para determinar las isotermas de adsorción de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) a diferentes temperaturas y actividades de agua (a_w) (Humedades relativas), con la finalidad de evaluar y encontrar sus condiciones adecuadas de almacenamiento, lo cual asegure su mayor estabilidad

Este trabajo tuvo como objetivo principal la determinación de las isotermas de adsorción de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) en la región de Madre de Dios.

Los objetivos específicos fueron:

- Determinar y evaluar experimentalmente las isotermas de adhesión de relente en la harina de castaña a 03 temperaturas (30, 40 y 50°C).
- Modelar las isotermas de adsorción de harina de castaña utilizando 05 modelos comúnmente estudiados en los alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, y Henderson).
- Determinar la energía de activación de los parámetros termodinámicos (del modelo de GAB (X_m , CGAB y KGAB).
- Determinar el calor isostérico de adsorción y ajustarlo en ocupación del comprendido de humedad de la Harina de castaña (a través de la ecuación exponencial de Tsami et al 1990).

Suponemos la hipótesis general que las isotermas de adsorción permitirán establecer los entornos adecuadas de anaquel de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*); aplicando diferentes temperaturas y humedades relativas en la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) se podrá encontrar la relación que

existe con el contenido de humedad y encontrar el modelo que mejor se ajuste a las isotermas y pueda influir en su mejor conservación y/o almacenamiento.

En este trabajo se consideró las variables independientes la temperatura (30, 40, 50) °C y humedades relativas (11.24% - 87.30%) que repercutieron en el comprendido de relente de equilibrio "g agua/g m.s" en la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*).

La muestra de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) que se utilizó fue la más representativa, homogénea, uniforme, tomando en consideración sus características organolépticas (color, textura, tamaño) para luego proceder a una operación unitaria para transformar en harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*).

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1. ANTECEDENTES

Gabas et al. (2009), estudiaron las características físicas de sorción del agua de la pulpa de lulo en polvo con encapsulantes. Los Antecedentes de humedad de equilibrio de polvo de pulpa de lulo (PL) con y sin aditivos – 58% de maltodextrina (MD) o 58% de goma Arábica (GA) – fueron definidos en las temperaturas de 20°C, 30°C, 40°C y 50°C manejando la técnica estático gravimétrico en condición de actividades de agua entre 0.06 y 0.90. Las isothermas exhibieron formato sigmoidal del tipo III, y el modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) se ajustó favorablemente con los datos experimentales de humedad de equilibrio en función de la actividad de agua. El complemento de encapsulantes impresiono las isothermas de manera que a la misma actividad de agua, las muestras PL + GA y PL + MD exhibieron un mínimo contenido de humedad de equilibrio las cuales no se vieron alterados debido a la gradiente de temperatura. Los calores isostéricos de sorción de las pulpas en polvo con encapsulantes fueron ascendentes (menos negativos) respecto a las pulpas de lulo en polvo, indicando la presencia de sitios polares más activos en el producto sin adición de GA o MD. Una correspondencia exponencial empírica se utilizó para referirse a la dependencia del calor de sorción con el contenido de humedad del material.

Ceballos et al. (2009), En la tesis de investigación se cotejaron las isothermas de adsorción a 20°C, 30°C, 40°C y 50°C de harinas de guanábana (*Annona muricata* L.) agregado con maltodextrina (MD) derivadas por técnica gravimétrico paralizado de medios con emerges repletas, y se valoró el acuerdo de los reseñas empíricos a los modelos de GAB (Guggenheim – Anderson – de Boer), Oswin, Henderson y Peleg. Se manifestó el predominio del clima en los derivaciones de las medidas disperejas; los valores del agua de la monocapa (X_m) derivados del tipo de GAB para las partículas de guanábana, se encontraban en un rango de 6,18% a 8,50% “kg de agua/kg sólido seco”. Las isothermas exhibieron representación sigmoidea tipologías del prototipo III. Se equilibró la presencia de lugares de alteración en las

isotermas para las climas en un rango de 0,63 y 0,70 de a_w , desarrollando levemente al aumentar las discrepancias de climas. Se afinó que el tipo que sobresale concuerda con la harina de guanábana con MD es el de GAB continuo del tipo de Oswin

Alakali et al. (2009), estudiaron las características de adsorción de humedad del jengibre (*Zinziber officinale*) en rodajas. Las muestras secas de jengibre fueron estudiadas para determinarse las condiciones de almacenamiento, la selección de materiales adecuados de empaque y determinar la termodinámica de la adsorción de humedad para la aplicación en el secado. Bajo actividad de agua constante (a_w), el comprendido de relente de proporción se acorto por incremento del clima (20, 30, 40 y 50°C), respectivamente. El contenido de humedad de equilibrio de todas las muestras aumento con el incremento del movimiento de agua, a temperatura constante. La saturación de sorción de las muestras de jengibre con cascara fue mayor que las muestras de jengibre sin cascara, mientras que las muestras de jengibre con cascara fue mayor que las muestras de jengibre sin cascara, mientras que las muestras de jengibre no escaldados con y sin cascara fue mayor que las muestras de jengibre escaldado con y sin cascara. La ecuación de Henderson permite previsiones más exactas de las isotermas describiendo mejor los datos de adsorción de los modelos de GAB, Oswin y Halsey. La humedad de la monocapa en general, se reduce con la temperatura para todas las muestras. El calor isostérico disminuyo cuando el contenido de humedad se aproximó al valor asintótico o al calor latente de vaporización de agua pura ($\Delta H_{st} = 0$), mientras que la entropía de sorción aumento con el contenido de humedad.

Ayala et al. (2011), determino las isotermas de adherencia de lluvia para harina de yuca a "20, 25, 30 y 35°C" a través de la técnica gravimétrico en el momento de movimiento de agua que varía entre "0.111 y 0.901". Los productos empíricos de adherencia se concertaron a través de los modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Henderson y Chung-Pfost. El calor isostérico de sorción (Q_{st}) se estableció mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron. Las isotermas derivadas mostraron una escritura sigmoidea "Tipo II". El comprendido de agua de proporción (CHE) se redujo con la ampliación del clima para un importe firme de movimiento del agua. Los presentadores de sorción GAB, Oswin y Smith existieron los que superiormente

se concordaron los productos empíricos. El Q_{st} se redujo con la ampliación del CHE alcanzar un precio grande y un imperceptible entre “118.84 y 45.20 kJ/mol” a aguas entre 5 y 35 (g agua/g ms) correspondientemente.

Vega et al. (2006), Se evaluaron las isothermas de adhesión de agua de harina de maíz a tres temperaturas (7, 22, 45°C) en un rango de actividad a_w entre 0.1 y 0.95 las isothermas se modelaron utilizando siete ecuaciones comúnmente aplicadas en alimentos. La característica del ajuste se evaluó con el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (%E), en función de los cuales se observó que los modelos propuestos por GAB, Oswin y Halsey ajustaron de mejor manera los datos experimentales. La humedad de la monocapa (X_m) y la humedad de seguridad (X_s) presentaron dependencia con la temperatura con valores de E_a de 13.6 y 3.3 kJ/mol, respectivamente. Se calculó el calor isotérmico de adhesión (Q_s) usando la igualdad de Clausius-Clapeyron, consiguiendo un máximo de 21 kJ/mol, para una humedad de 0.075 g agua/ g m.s., esta medida se modelo manipulando la ecuación propuesta por (Tsami et al. 1990).

Choque et al. (2009), determino las isothermas de adsorción del Maíz Morado (*zea mays L*) del tipo “Canteño”, entre una variación de temperaturas de 18, 25 y 30°C, para el rango de a_w de 0.065 a 0.95; fueron necesarios 7 modelos matemáticos, siendo los modelos de GAB y Halsey los que presentaron un adecuado comportamiento experimental de adsorción del maíz morado. Se determino que el agua de medida se reduce con la variación de temperatura, es así que ocurre un entrecruzamiento de las isothermas a la a_w de 0.70 para el agua de medida, X_e de “0.17g de agua /g m.s”. La humedad de la monocapa (X_m), exhibió sometimiento con la temperatura, reduciendo de 0.079 a 0.065 g de agua /g m.s en el rango de temperaturas de 18 a 30°C; observo también que los datos de calor isostérico se acrecienta con la depreciación de la humedad de equilibrio de 0.016 a 7.712 kJ/g para la condición de agua de proporción de 0.07 a 0.17 “g de agua/g m.s”. También se determinó el carácter de activación manejando la igualdad de Arrhenius en los modelos termodinámicos X_m y C_{GAB} , presentando valores de 11.46 y 7.28kJ/kg respectivamente.

Pulla (2011), Determino las isothermas de adsorción del ají (*Capsicum annum L.*) seco. Las isothermas fueron determinadas a las temperaturas de 25°C, 35°C, 40°C,

a través del método gravimétrico estático, con soluciones salinas saturadas en un rango de actividades de agua (a_w) de 0.11 a 0.85. Las curvas de adsorción del ají seco exhibieron un comportamiento del tipo III, característico de materiales ricos en carbohidratos. Se visualizó que el agua de proporción (x_e) se reduce debido al aumento del clima para una determinada a_w , semejante a la mayoría de los productos agrícolas. Los datos experimentales (x_e) en función de la (a_w) fueron ajustados a seis modelos de isothermas comúnmente aplicados en alimentos (BET, GAB, HALSEY, OSWIN, CHUNG-PFOST y HENDERSON). Según los parámetros estadísticos de análisis, los modelos de Halsey y GAB fueron los que mejor se ajustó la conducta experimental de adsorción del ají seco, mostrando datos de coeficiente de determinación R^2 por encima al 96% desvió porcentual medio P menores al 10% errores estimados de humedad SEM inferiores a 0.022 y una distribución aleatoria de los residuales

Torrealba, (2007), determinó las isothermas de sorción de lluvia en harina precocida del plátano verde (*Musa paradisiaca L.*) ajustando la conducta a cuatro temperaturas distintas (20, 25, 30 y 35 °C), en un parámetro de a 0,202 a 0,835. Los datos experimentales de actividad de agua y contenido de humedad, se concordó a las ecuaciones planteadas por Ratti *et al.* (1989); Chung y Pfof (1967); GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y la ecuación BET (Brunauer *et al.*, 1938); recurriendo al análisis de regresión no lineal y el coeficiente de determinación (R^2) del programa Statistic V-6. De los modelos estimados fueron Ratti *et al.* (1989) y Chung y Pfof (1967) los que concordaron mejor las isothermas de sorción; el primero mostró un coeficiente de determinación de 0,991 y 0,996, para las temperaturas ensayadas y el segundo un coeficiente entre 0,9735 y 0,9876. Se constituyó el importe de la monocapa con la igualdad de BET (Brunauer-Emmett-Teller, 1938) y GAB "(Guggenheim-Anderson-de Boer, 1984)", con mejores resultados con el modelo de BET, cuyos productos se situaron entre 0,0243 y 0,0033 g de H₂O/g de sólido. En conclusión se valoró el calor isostérico de sorción solicitado por la harina precocida de plátano verde para conseguir la medida de sorción, determinada por la ecuación de Clausius-Clapeyron en su forma completada (Soekarto y Steinberg, 1981), concluyéndose que este calor modifica con la temperatura y el contenido de humedad.

1.2. GENERALIDADES DE LA CASTAÑA (*Bertholletia excelsa* H.B.K)

La castaña amazónica (*Bertholletia excelsa* H.B.K) es una semilla nutritiva que crece de forma rústica en algunas regiones amazónicas de Sudamérica, sobre todo, en Bolivia, Brasil y Perú. En el mercado internacional se la conoce como nuez del Brasil (Brazil Nut) y en el Perú, simplemente, como castaña. Comercialmente, esta semilla es considerada dentro del grupo de semillas secas como la almendra, la avellana, la nuez o la pecana (**Espinoza, 2005**).

La castaña se desarrolla con mayor actividad en climas tropicales a temperaturas entre 24.3 y 27.2°C, lluvias anuales que varían entre 1,400 y 2,800 mm, una humedad relativa anual varía entre 79 a 91 %, y un total anual de horas de brillo solar que oscila entre 2,000 y 2,500 horas. El castaño necesita de mucha luz para su desarrollo; la presencia de arbustos impide su crecimiento. (**Zuidema, P; Wim, D; Jeannette V R., 1999**).

En el Perú, los bosques comerciales de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) se encuentran sólo en el departamento de Madre de Dios.

El fruto es una cápsula de tipo pixidio incompleto, llamado popularmente "coco", en español y "ouriço", en portugués. Es redondo o levemente aplastado, con cápsula dura y leñosa; ápice del fruto con una región diferenciada de 7 a 10 cm de diámetro, en cuyo centro se encuentra un orificio de 1 cm de diámetro, correspondiendo al opérculo. El peso de cada fruto varía entre 200 y 2,000 g. con diámetro de 10 a 25 cm, con una cantidad de 18 semillas angulosas aproximadamente de 4 a 7 cm de longitud, Las semillas de castaña tienen un revestimiento rugosa, dura y leñosa, y en su interior una semilla de color blanquecino envuelta en una epidermis marrón. Aunque la producción de un árbol de de castaña es muy variable, se calcula que produce de 100 a 120 kilos de semillas. La castaña presenta una inflorescencia en racimos terminales de 20 a 40 cm de largo, y flores de color blanco y cremoso o amarillento, de 2 a 3 cm de diámetro, las hojas son simples, alternas, cóncavas, de color verde oscuro a verde amarillento con una amplitud de 17 a 50 cm y un ancho de 6 a 15 cm (**Villachica, 1996**).

La actividad de recolección y procesamiento de la castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) es de gran importancia social, económica y culturalmente para el departamento de Madre de Dios, pues implica entre 15,000 y 20,000 personas, comprendiendo 6,500 familias cuyos ingresos están atados a la actividad en su producción, constituyendo una actividad emblemática. El 57% de los castañales se sitúan en las zonas contiguas a las carreteras y el 43% a los ríos (**Candela, 2006**).

1.2.1. CLASIFICACION TAXONOMICA

Según **Villachica (1996)**, la clasificación taxonómica de la castaña es la siguiente:

Reino : Vegetal

Tipo : Fanerógama

Sub tipo : Angiosperma

Clase : Dicotiledónea

Orden : Mirtales

Familia : Lecythidaceae

Género : *Bertholletia*

Especie : *excelsa*, H.B.K.

1.2.2. ECOLOGIA

La castaña es un género adecuada a climas cálidos húmedos subtropical con y sin cosecha seca. En el Perú, los castañales más densos se encuentran en la zona contigua con Bolivia y Brasil, concretamente en el departamento de Madre de Dios.



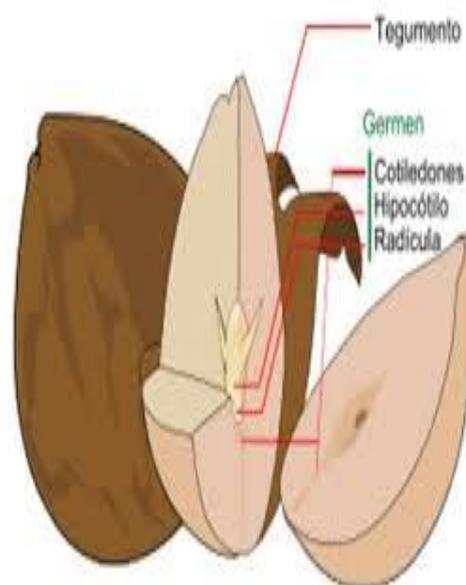
A: **Árbol de castaña**



B: **Castaña en cascara**



C: **Longitud de la Castaña**



D: **Partes de laCastaña**

Figura 1:A: **Árbol de castaña**; B: **Castaña en cascara**; C: **Longitud de la castaña**; D: **Partes de la castaña.**

Fuente: **Chang, J.C, (1999)**

1.2.3. VALOR NUTRICIONAL

La constitución centesimal del producto está constituida por 75% de cáscara y 25% de castaña. Los frutos pertenecen a 50% del peso de las nueces, o 12,5% del peso de los frutos y forman una importante fuente de calorías y proteínas. La castaña es fundamentalmente aceitoso, con buen tenor de proteínas, las cuales contienen los ocho aminoácidos fundamentales para la dieta humana, siendo, entre los alimentos de origen vegetal. **(Villachica, 1996)**

Algunos componentes químicos presentes en la castaña se encuentra en proporciones mucho mayores que en almendras similares. Estos componentes son el bario, bromo, cobalto, cesio, magnesio, níquel, rubidio y selenio. Los niveles de bario, cesio y selenio que en la castaña son 1,764, 1,3 y 11 ppm, correspondientemente, en otras nueces y almendras comestibles muestra contenidos insignificantes. En la nuez del marañón (*Anacardium occidentale*), el contenido de bario es apenas 0, 1 ppm, el de cesio 0, 1 ppm y el de selenio 0,2 ppm. **(Figueiredo, 1994).**

Tabla 01: **Composición nutricional de castaña amazónica (en 100 g)**

COMPONENTE	VALOR
Calorías (g)	690
Total grasas (g)	66
Saturadas (g)	16
Polidesaturadas (g)	24
Monodesaturadas (g)	23
Colesterol (mg)	0
Sodio (mg)	2
Carbohidratos(g)	12.8
Fibra de dieta (g)	5.4
Proteína (g)	14

Fuente: **Villachica (1996).**

1.3. USO Y POTENCIAL COMERCIAL

La castaña es usada en, al menos, tres industrias: la de alimentos, la cosmética y la de aceites no comestibles. En la industria de alimentos, se la usa como insumo para la elaboración principal de productos macrosnack, es decir productos comestibles “listos para consumir” (ready to eat) como: Helados, Galletas Dulces, Galletas saladas, Chocolates, Kekes, Barras de cereal, pastelitos, Snacks salados de semillas y frutos secos. Asimismo, se la usa para la elaboración de postres como: Mazapanes, puré de castaña **(Collada, 1984)**.

En la industria cosmética se la usa para hacer: Jabón en base de aceite de castaña, Sanitizador. Todos estos productos recuren a la propiedad humectante y nutritiva que aporta el aceite de esta semilla. En ese aspecto, Brasil es uno de los países que ha desarrollado este mercado elaborando y exportando una gama amplia de alternativas **(Miller, D. 2007)**.

El departamento de Madre de Dios es el único departamento del Perú donde se halla bosques con suficientes árboles de castaña para crear una actividad económica en torno a la cosecha de sus productos, es Madre de Dios. Esta región resguarda el 100% de la producción nacional, y, se entiende que los bosques naturales castañeros dominan un área aproximada de 2.5 millones de hectáreas que constituyen el 30% de la superficie de la Región **(Arana, 2001)**.

La actividad castañera es de gran importancia en la región de Madre de Dios, cerca del 20%-25% de su población dependen directa e indirectamente de la misma. Así mismo, genera cerca del 67% del total de ingresos anuales de las familias que se dedican a esta actividad.

Por la importancia que tiene dicha actividad, el Gobierno Regional de Madre de Dios, dada la gran importancia económica, social, ecológica y cultural como un producto de valor estratégico para el desarrollo económico de sus agricultores y la generación de riqueza, declaró en agosto de 2009 a la “Castaña Amazónica del Perú” como su Producto Bandera **(Escobal, 2011)**.

El nivel de producción durante el periodo 2005-2011, en general se ha mostrado creciente y superior a las 4,000 toneladas, a excepción del año 2010 donde se registraron 3,818 toneladas. Cabe resaltar que el año 2011, se logró el mayor volumen producido (8,372 toneladas).(**Dirección Regional de Agricultura de Madre de Dios, 2012**).

1.4. EL AGUA EN LOS ALIMENTOS

Según **Clemente (2003)**, El agua es el elemento que predomina los procedimientos alimentarios, interviniendo de forma predominante en las variables de la causa, las particularidades del fruto y elementos de permanencia. Todos los alimentos presentan agua y se entiende que están dispuestos a degradación (tanto física como química) son los que presentan elevados niveles de agua. El agua interviene en la totalidad de los fenómenos físicos, químicos y microbiológicos que suceden en los alimentos ya que establece el medio de reacción y es el elemento principal en la totalidad de ellos.

El agua contenida en los alimentos se muestra en diferentes formas, en función de las interacciones que consten entre los elementos de la materia seca del alimento y las moléculas de agua (**Lopes-Filho, et al. 2002**). Respecto a esto, el agua se conserva unida debido a fuerzas de atracción molecular, o bien está fijamente ligada a la sustancia adsorbente; el término sorción se usa para indicar esa interacción agua-sustancia adsorbente (**Prieto, Gordillo. 2006**).

El agua es un elemento que somete los procedimientos alimentarios, influyendo significativa en los versátiles de la causa, las particularidades del fruto y elementos de seguridad (**Ikhu-Omoregbe, 2006**).

Se determinó que diferentes muestras de alimentos con el parecido contenido de agua aplazan significativamente en su permanencia y vida de anaquel. En efecto, el contenido de agua por sí solo, no es un indicador real de la estabilidad. Este entorno se debe, en parte, a discrepancias en la intensidad con que el agua se relaciona con los componentes no acuosos; el agua comprometida en interacciones fuertes es menos susceptible o vulnerable para las actividades degradativas, tales como el desarrollo de microorganismos y las reacciones químicas de hidrólisis, que

el agua débilmente asociada. El término “actividad de agua” (a_w) se estableció para tomar en cuenta la fuerza con que el agua se relaciona a los diferentes compuestos no acuosos (**Fennema, 2000**).

1.5. ACTIVIDAD DEL AGUA

La actividad de agua (a_w) es una medida que revela el medio de agua de un alimento para que se lleve a cabo resistencias químicas, bioquímicas “(por ejemplo oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacciones de Maillard) y proceso contagioso (**Fennema, 2000**), citado por (**Pulla, 2012**)”. Por esto la actividad de agua es un parámetro comunmente usado como indicador para predecir la vida útil de un alimento. El concepto de a_w fue introducido en 1975 por el microbiólogo Scolt la que se considera junto con la temperatura uno de los parámetros más significativos que influyen en las reacciones de deterioro de los alimentos (**Caps y Abril, 2003**, citado por **Choque, 2009**).

Según **Marques (2009)**, la actividad de agua (a_w) es definida por la analogía entre la presión parcial del vapor de agua en el alimento y la influencia del fluido del agua pura a semejante clima. En el caso de agua pura, la relación entre las presiones es 1, pues los constituye químicos presentes inmovilizan parcialmente el agua.

La disposición del valor del Actividad de Agua es un instrumento de predicción de la seguridad física, química y microbiológica, y por consecuencia, la vida de anaquel de los alimentos (**Labuza, 1980**), citado por (**Viccina, 2006**).

En realidad, la actividad del agua es la dependencia de la fugacidad de la solución (f) y la fugacidad del solvente puro (f_0). Se entiende por fugacidad la tendencia del solvente de “escapar de la solución” (**Marques, 2009**). El agua tiene una presión de vapor baja a temperatura ambiente, por lo que puede considerar que su conducta es idónea en la etapa de vapor (**Clemente, 2003**). La actividad del agua puede ser expresada por la siguiente ecuación.

$$a_w = \frac{f}{f_0} = \frac{P}{P_0} = \frac{\text{HRE}}{100} \quad (1)$$

Dónde:

P= Presión parcial de fluido de agua en el alimento.

EP₀= Presión de saturación del agua líquida pura a igual clima.

HRE = Humedad relativa de equilibrio.

En el equilibrio, la actividad de agua del alimento se iguala a la humedad relativa del ambiente en el cual se halla. En estas condiciones, el alimento no gana ni pierde agua (**Marques, 2009**).

En la actualidad, las determinaciones de la actividad del agua son una práctica muy común en los laboratorios de alimentos. Esto resulta de un aumento en el reconocimiento de la importancia del dinamismo del agua en la caracterización del estado del agua en suministros, especialmente su disponibilidad para los cambios biológicos, físicos y químicos. Por esto la actividad de agua es una medida muy usado para indicador para predecir la vida de anaquel alimento (**Vega et al, 2005**).

1.6. ISOTERMA DE SORCION

La isoterma de un producto corresponde gráficamente, a una temperatura invariable, el incluso de agua de proporción de una utilidad con la rapidez termodinámica del agua del mismo, ya que en el equilibrio, este último parámetro es semejante a la lluvia respectiva del aire que rodea al producto. Las isotermas son significativos para el estudio y diseño de muchos conocimientos de innovación de alimentos, como el secado, mezcla y envasado de los mismos. Además son significativos para presagiar los cambios en la permanencia de los alimentos y en la elección del material del empaque (**Zhang, 1996**).

El estudio de las isotermas de sorción de la humedad para los alimentos constituyen las participaciones higroscópicas compuestas de muchos componentes cuyas propiedades de sorción pueden cambiar debido a las interacciones físicas y químicas causadas por procesos de calor u otros pre-tratamientos (**Iglesias y Chirife, 1982**, citado por **Araujo, 2001**).

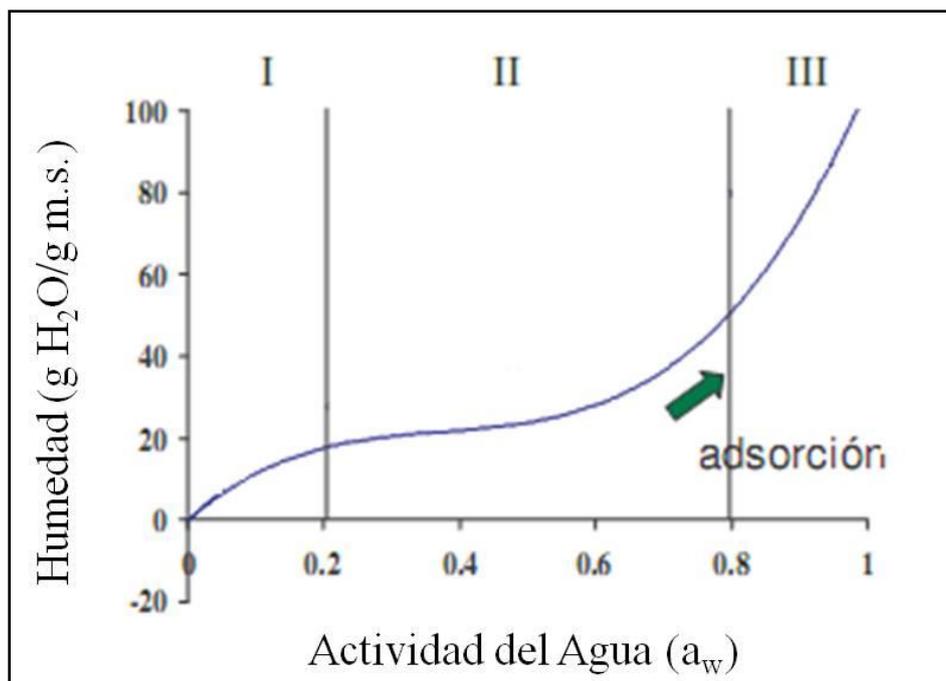


Figura 02: **Isoterma de adsorción**

Fuente: **Ponce (2005)**

1.6.1. ZONAS EN LA ISOTERMA DE SORCIÓN

Según **Fennema (1993)**, menciona que para comprender el valor y la ventaja de las isotermas de sorción, es conveniente dividir las isotermas de sorción en tres zonas, como se aprecia en la figura N° 02.

a. El agua presente en la zona I corresponde desde 0 a 25 unidades de actividad de agua (**Jamieson y Jobber, 1970**), además **Cheftel y Cheftel (1976)**, mencionan que esta zona es denominada agua fuertemente ligada. Esta agua está absorbida a sitios polares asequibles por interacciones agua-ión o agua-dipolo. **Fennema (1993)**, menciona que estos sitios polares son especialmente grupos NH₂⁺ y COO⁻ de las proteínas y de los grupos OH⁻ de los almidones y posiblemente, asimismo el agua de cristalización de las sales y azúcares.

El final de mayor humedad de la zona I (el final de las zonas I y II) pertenece al contenido de humedad "monocapa" del alimento. Al contrario de lo que puede deducir del nombre, la monocapa no representa la cobertura de toda la materia seca por una manto escueto de moléculas de agua macizamente empacadas, no

comprendiéndose plenamente su significado exacto a nivel molecular, probablemente la mejor interpretación es considerar el valor monocapa como el conjunto de agua necesaria para formar una monocapa sobre los conjuntos hondamente polares y asequibles de la materia seca, quizá sobre la base aproximada de 1 mol de agua por 1 mol de grupos altamente polares. En otro sentido, el importe de la monocapa pertenece a la cantidad máxima de agua que está muy vigorosamente ligada a la materia seca (**Fennema, 1993**).

Cheftel y Cheftel (1976), reportan que la energía de adsorción del agua de esta monocapa es de la disposición de 1 a 15 Kcal/mol, lo que expone que el agua de esta capa sea respectivamente difícil de eliminar y no está utilizable para proceder como disolvente.

b. Esta zona II según **Jamieson y Jobber (1970)**, se encuentra en el rango de 0.25 a 0.75 unidades de actividad de agua. Esta zona es denominada agua débilmente ligada. El agua de la zona II de la isoterma consta del agua de la zona I más el agua añadida (procedimiento de resorción) confinada de la zona II. El agua añadida de la zona II irrumpe los remanentes sitios de la primera capa y distintas capas añadidas en torno a los grupos hidrofílicos del sólido, distinguiendo agua de la multicapa; el agua multicapa se asocia con las moléculas vecinas principalmente por enlaces de hidrógeno agua-agua y agua-soluto (**Fennema, 1993**).

c. El agua de la zona III de la isoterma consta del agua de las zonas I y II más el agua añadida (procedimiento de resorción) dentro de los confines de la zona III. Esta zona es denominada agua en capilares y agua libre (**Matos, 1992**). El agua añadida de la zona III es el agua menos vigorosamente sujeta y más inmóvil (molecularmente) de los suministros. Esta agua es utilizable como solvente y suficientemente abundante y normal para que se lleve a cabo las reacciones químicas y el desarrollo microbiano ocurran rápidamente (**Fennema, 1993**).

Jamieson y Jobber(1970), indican que la zona III, mostrada en la figura 02, está comprendida en el rango de 0.75 a 0.99 unidades de actividad de agua.

Matos (1992), menciona que esa zona está comprendida por agua presente en multicapas de proteínas y polímeros de carbohidratos, además la presión de vapor de agua es reducida por los solutos disueltos como aminoácidos libres, azúcares y/o atracción capilar en la micro estructura.

Debe resaltarse que las fronteras que separan las zonas de la isoterma no pueden establecerse con exactitud. Además la adición de agua a un material seco puede alterar algo las propiedades del agua que ya está presente (procesos de disolución e hinchamiento de matriz) conceptualmente es útil considerar que el agua de la zona I permanece casi constante al añadir el agua de la zona II y que el agua de la zona II permanece casi constante al añadir el agua de la zona III (**Fennema, 1993**).

1.6.2. INTERES DE LAS ISOTERMAS DE SORCION PARA LA TECNOLOGIA ALIMENTARIA

La comprensión de las isotermas de sorción de humedad es uno de los medios más apropiados en el estudio de su influencia en los alimentos, pues permite establecer las condiciones ideales para su manipulación y conservación. Permite prever el tiempo de secado, el tiempo de la vida de anaquel de los productos deshidratados acondicionados en embalaje permeables y las condiciones de equilibrio después de la mezcla de productos con distintas actividades de agua (**Zuidema, 2002**).

Las isotermas proporcionan información para el establecimiento de relaciones termodinámicas, las cuales admiten una definición teórica de los efectos prácticos. A través de estas funciones se puede determinar la energía libre necesaria para la transferencia de moléculas de agua en el estado de vapor hacia la superficie del alimento. Se puede determinar la entalpia o calor de sorción del agua, lo cual proporciona la energía de interacción entre el agua y el alimento, siendo por tanto un índice de gran importancia al proyectarse equipos de secado (**Bernárdez, 2000**).

Además son importantes para la conjunto de técnicas de los alimentos:

a) Admite conocer la humedad de medida, ya que ésta es una propiedad muy importante que tiene un impacto característico dentro del manipulación, proceso y

almacenamiento de todos los servicios higroscópicos. (**Matos-Chamorro, 2010**), indican que la humedad de medida es el contenido de humedad en la cual la coerción de vapor de agua del fruto y la atmosférica se emparejan y no ocurre adsorción y desorción.

b) Las isotermas de sorción dan la eventualidad de prever la conducta de un alimento después de su tratamiento o acopio en unos entornos distintas a las que se estudió experimentalmente (**Cheftel y Cheftel, 1976**).

c) El cálculo de áreas dinámicas y la área segura de un fruto es de vital importancia para la adsorción de sustancias volátiles o gaseosas (**Garica, S; Schmalku, M; Tanzariello, A.; 2007**).

d) En ingeniería, una isoterma de desorción es útil para pronosticar el tiempo de secado de un alimento y evaluar la energía solicitada para el proceso de secado (**Mclaughlin, P; Magee.; 1998**).

e) Para el análisis del comportamiento de sorción de mezclas de alimentos complejos, frecuentemente es deseable calcular la isoterma de sorción de la mezcla; en algunos casos, esto es posible a partir del conocimiento de las isotermas de los componentes y las fracciones en peso de los componentes (**Iglesias et all., 1980**, citado por **Iglesias y Chirife, 1982**). En la formulación de alimentos deshidratados de varios componentes, tales como sopas o salsas secas, la isoterma de sorción de cada componente debe ser conocida para predecir y evitar una transferencia de agua indeseable desde las sustancias de alto movimiento de agua hacia los sitios de bajo movimiento de agua. **Salwain y Slawson(1959)**, citado por **Iglesias y Chirife (1982)**, desarrollaron un procedimiento, el cual está basado en la idea de que en el equilibrio todos los productos tienen la mismo movimiento del agua, las porciones de las isotermas en cada componente se aproximan por líneas rectas y pendientes evaluadas para calcular la actividad del agua de equilibrio.

1.6.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE SORCION

Brunnauer, Deming y Teller (1940), citado por **Mathlouthi, (2003)**, da a conocer cinco tipos de procedimiento de isoterma de adsorción (figura 03), el tipo 1 corresponde a la isoterma de Langmuir que describe la adsorción monomolecular de gas sobre un sólido poroso, el tipo 2 es la isoterma distinguida como sigmoide característica de productos solubles, muestra una tendencia asintótica conforme la actividad de agua se acerca a la unidad. La isoterma tipo 3 o de Flory-Huggings se encuentra en la adsorción de un disolvente o plastificante como el glicerol. El tipo 4 muestra la adsorción por un sólido hidrófilo "hinchable", hasta que alcance el máximo de espacios de hidratación. Finalmente el tipo 5 llamado isoterma BET que incorpora la adsorción multimolecular observada en la adsorción de vapor de agua sobre carbón. Los contornos de isotermas más habituales en alimentos son los de comportamiento 2 y 4.

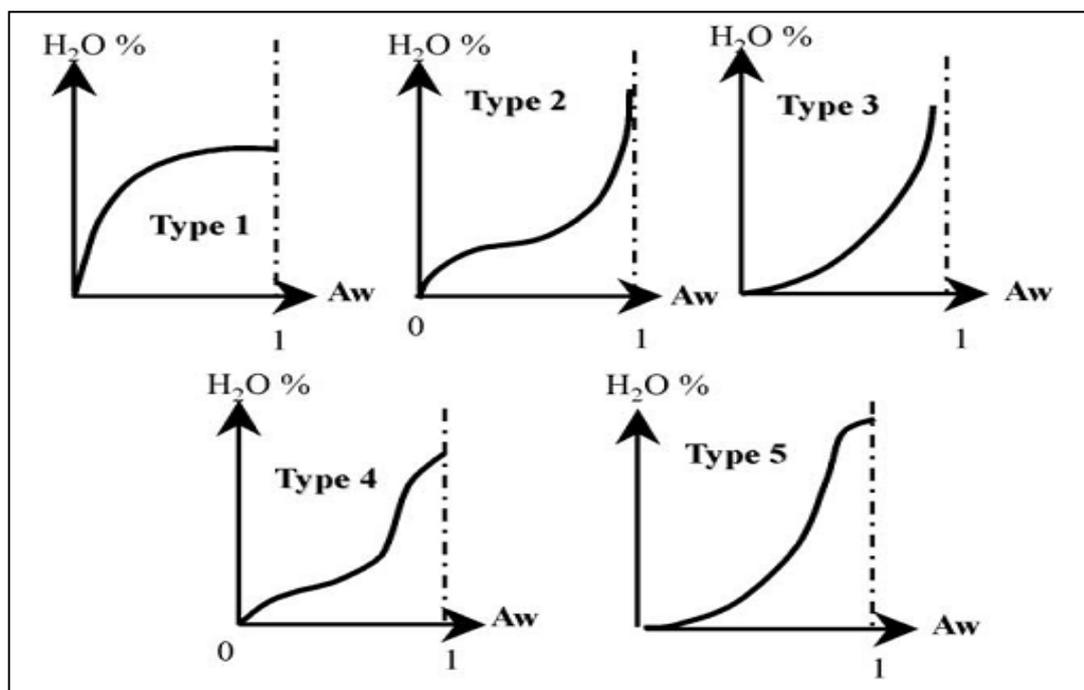


Figura 03: Los cinco tipos de Isotermas.

Fuente: **Brunnauer, Emmett, y Teller (1938)**, citado por **Mathlouthi, (2003)**.

1.6.4. ADSORCION

Se ha investigado durante largos años éste fenómeno llegándose a establecer claramente dos tipos de adsorción: química y física.

Según **Mysels (1967)**, se trata de un fenómeno físico-químico por el cual un componente, sea líquido, gaseoso o sólido, ha pasado a adherirse en la superficie de un sólido o de un líquido, con la cual puede reaccionar (adsorción química) o sólo condensarse (adsorción física).

La adsorción química implica transferencia de electrones entre el adsorbente y el adsorbato, característica clásica de una reacción química. En cambio, la adsorción física es causada por fuerzas atractivas de Van der Waals entre moléculas polares (dipolos) o también dentro de una situación de inducción dipolar. Esta adsorción es de carácter similar a la condensación de moléculas de vapor sobre un líquido de la misma composición (**Satterfield, 1991**, citado por **Viccina, 2006**).

Para el caso de los alimentos la adsorción es de tipo físico (**Sifuentes, 1992**), es decir, se trata de una adsorción física del vapor de agua por los alimentos.

Cabe también hacer la diferenciación entre absorción y adsorción. La adsorción, a diferencia de la absorción, se da cuando el elemento o sustancia está disuelto y compenetrado o atrapado dentro del sólido, por ejemplo, tenemos la absorción del hidrógeno por el paladio. Esta diferencia entre absorción y adsorción es evidente en ciertos casos, pero en otros, especialmente cuando la materia adsorbente es un sólido muy poroso con amplia superficie interna, la distinción entre adsorción y absorción es muy difícil.

1.6.5. FACTORES EN LA ADSORCIÓN:

Entre los principales elementos que influyen en la adsorción podemos mencionar:

a) Temperatura

La reacción entre el adsorbente y el material adsorbido es a veces lenta (Adsorción química) y necesita una elevada energía de activación. De las muchas partículas que llegan a la superficie y se adhieren a ella por fuerzas de Van der Waals, muy pocas adquieren la suficiente energía por casuales colisiones y llegan a ser adsorbidas químicamente. Esta manera de adsorción es dependiente de la temperatura **(Mysels, 1967)**.

La temperatura del sistema aumenta cuando las fuerzas de la adsorción son tan grandes que pueden liberar una gran cantidad de energía en el mismo instante en que ocurra el fenómeno.

En la adsorción física, si se eleva la temperatura del medio, la capacidad de rebose por vapor de un medio aumenta. Es decir, la cantidad de gas físicamente adsorbido decrece.

A una temperatura constante la humedad relativa de un medio decrece si la cantidad o presión parcial de vapor de agua de éste disminuye. Cuando el calor es eliminado por radiación, conducción y convección, baja el nivel de la temperatura de la superficie y la adsorción alcanzará un valor final de equilibrio.

b) Presión

Este factor es clave en la adsorción de agua en un sólido, sabemos que el agua se adsorbe en función al valor de la gradiente de presión parcial de vapor entre el agua y el sólido.

Es lógico considerar que la adsorción ocurre en el momento que la presión parcial del vapor de agua en el medio es mayor que la presión parcial de vapor de agua en el sólido. Es decir, sucede una migración de moléculas de agua hacia la superficie del sólido hasta que ambas presiones se equilibren (adsorción positiva).

La influencia parcial del vapor de agua en el medio es menor que la presión parcial de vapor de agua en el sólido, ocurre una pérdida de moléculas de agua por parte del sólido (adsorción negativa).

c) Polaridad

Es importante considerar la polaridad de las moléculas del material adsorbido y del adsorbente.

Existen moléculas polares y no polares. En el caso de una molécula polar adsorbida en una determinada superficie, su orientación será totalmente no aleatoria. Asimismo, moléculas no polares y simétricas cuando son adsorbidas, resultan firmemente retenidas por fuerzas de Van der Waals (**Myself, 1967**, citado por **Viccina, 2006**).

Estas fuerzas se generan a partir de dipolos inducidos. Esto lo explica **Adamson (1997)**, en base a la teoría de polarización: en la adsorción de moléculas no polares la superficie del adsorbente induce a la formación de dipolos en la primera capa adsorbida, y ésta a su vez induce los dipolos en la siguiente capa adsorbida y así sucesivamente. **Adamson (1997)**, señaló que la polarización de las capas debe ser vista como un fenómeno en que intervienen fuerzas de Van der Waals.

En el caso del agua y los alimentos, el adsorbato (agua) es de naturaleza polar y el adsorbente es bastante heterogéneo en polaridad, lo cual nos llevaría a deducir que el fenómeno de polaridad se llevará a cabo entre el agua y los sitios más polares del alimento. Esta hipótesis del comportamiento fisicoquímico del adsorbato y adsorbente en un fenómeno de sorción en alimentos, ha sido respaldada por los resultados de los trabajos de investigación de **Pauling (1945)**, **Mc Laren et al. (1952)**, **Cardew y Eley (1958)**, y **Heldman et al. (1965)**, citados por **Oviedo (1969)**.

d) Área de adsorción

Los diferentes métodos para determinar el área superficial de un sólido se basan en la medida de algunas de sus propiedades, y por lo tanto los resultados que se obtienen difieren. Según **Adamson (1997)**, el problema consiste en que no se puede establecer un concepto absoluto del área superficial, ya que se hace cada vez más difícil conforme se la examina con más detalle. Por lo tanto, es arbitrario el tratar de definirla con un determinado método y con un valor absoluto. Nótese

que cuanto más refinados son los métodos de determinación se halla más y más área superficial de un determinado sólido. Tal vez por ello la más próxima o cercana alcance a un área absoluta que está dada por el área geométrica de una superficie plana líquida.

Según **Adamson (1997)**, en el caso de sólidos existe la dificultad de que la superficie de átomos y moléculas difieren en sus propiedades dependiendo del lugar en que se encuentren (posición con respecto a moléculas vecinas) y por ello la superficie de los átomos puede permanecer casi indefinidamente en posición inestable variando sus propiedades de acuerdo al plano expuesto. Como la energía y entropía de una molécula en la región superficial no son necesariamente proporcionales entre ellas, la presencia de configuraciones inestables en la superficie puede afectar la energía libre y la energía total de la superficie en forma diferente. En casos en que la adsorción depende de la energía superficial o de los espacios interatómicos, la cantidad de material adsorbido en una serie de muestras hipotéticas de sólidos de igual área total pero diferentes en energía superficial puede ser muy distinta. En tales casos, aún las cantidades relativas adsorbidas en las diferentes muestras no sería una medida de sus áreas relativas. Felizmente se tiene mayor interés en estas áreas de superficies relativas que en valores absolutos.

Mysels (1967), observó que las superficies convexas de un líquido, tal como la de una gota, tiene una mayor presión de vapor que una superficie plana. Inversamente, en una superficie cóncava, por ejemplo la superficie del agua encerrada en el estrecho, tiene una pequeña presión de vapor a las anteriores. Desde el punto de vista molecular se puede apreciar perfectamente que una molécula es cada vez más rodeada por moléculas vecinas conforme la superficie cambia de la forma convexa a la cóncava; consecuentemente, en esta última forma habrá, para cada molécula, mayor posibilidad de interacción, y por lo tanto menor tendencia a evaporar y menor presión de vapor. En una gota la tensión superficial ejerce una presión positiva, mientras que un menisco cóncavo ejerce una presión negativa; estas presiones suben y bajan la presión de vapor respectivamente.

En condiciones constantes, la cantidad adsorbida, por el sustrato, es proporcional a la superficie disponible y generalmente al peso del adsorbente. Es así que la cantidad adsorbida es expresada, por lo general, por unidad de peso, tal como gramos o moles de agua por gramo de adsorbente. También puede ser expresada en términos de coberturas mono moleculares o porcentaje de cobertura, cuando la superficie adsorbente es conocida.

1.6.6. MODELOS MATEMATICOS PARA LAS ISOTERMAS DE SORCION

Se propusieron varios modelos teóricos, semi teóricos y empíricos que expresan el contenido de lluvia de proporción de los suministros. Por ello los modelos teóricos implican los elementos físicos de sorción de humedad, algunos de los cálculos realizados en el progreso de las ecuaciones consiente en resoluciones que logran trascender en pronósticos teóricas incorrectas de los productos de a_w (**Brooker et al., 1974**), citado por (**Sandoval et al., 2002**).

Las ecuaciones utilizadas en el presente trabajo para describir el procedimiento de las curvas de adhesión de lluvia de las muestras de harina de castaña, son mostradas a continuación.

1.6.6.1. Modelo de BET - Brunauer, Emmet y Teller (1938)

Se utiliza con mayor frecuencia por que proporciona un excelente ajuste para una diversidad de alimentos sobre una zona de actividad de agua entre 0.05 y 0.45, siendo expresado de la siguiente forma (**Rizvi, 1986**, citado por **Gabas, 1998**).

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)} \quad (2)$$

Dónde:

X_e = Contenido de humedad (b.s.)

a_w = Actividad de agua.

X_m = Contenido de humedad de la monocapa (b.s.).

C = Constante de BET relacionada al calor de sorción.

1.6.6.2. Modelo de GAB – Guggenheim, Anderson y De Boer (1984).

Es una igualdad con tres parámetros, utilizado para ajustar los datos de sorción de productos alimenticios con actividades de agua de 0.9 (Lima, 2006). Este modelo es muy utilizado en alimentos y recomendado por el Proyecto Europeo COST 90, que explica las propiedades físicas en alimentos. Está establecida en la teoría de adsorción de BET, el cual explica físicamente los parámetros implicados en ella (Kiranoudis *et al.*, 1993, citado por Vega *et al.*, 2006).

La isoterma de GAB ha sido favorablemente demostrada en datos de adsorción de gases, como en absorción de vapor soluciones agrupadas de electrolitos, alimentos, proteínas y otros materiales.

Lomauro *et al.* (1985), citado por Lima (2006), verificaron que el modelo de GAB puede representar con gran precisión más del 50% de las isotermas de frutas, vegetales y carnes, en comparación con las ecuaciones de dos parámetros. Este modelo tiene una cobertera invariable k , que calcula la contradicción de potencial químico estándar entre los elementos de la sustituta fase y las del cambio neto puro. Si k es mínimo al mecanismo, se apreciará una sorción mínima a la citada por BET. (Zug, 2002a).

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot k \cdot a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)} \quad (3)$$

Dónde:

- a_w = Actividad de agua.
- X_e = Humedad de equilibrio.
- X_m = Humedad de la monocapa molecular.
- C = Constante de Guggenheim, rasgo del producto y relacionado con el calor de adsorción de la monocapa.
- k = Factor de corrección coherente con el calor de sorción de la multicapa.

1.6.6.3. Modelo de Halsey (1948)

Este modelo es utilizado para analizar isothermas de sorción de diversos alimentos, mostrando un buen ajuste para productos ricos en almidón, como el maíz, papa y trigo, para valores de a_w que se encuentran entre 0.1 a 0.8; es así que **Halsey (1985)**, citado por **Lima (2006)**, desarrollo un modelo matemático que considera la concentración de las multicapas a una distancia respectivamente grande de la extensión, asumiendo que la magnitud del parámetro B determina el ejemplo de interacción entre el vapor y el sólido, pues si B es grande, la atracción entre el sólido es muy específica y no se extiende muy lejos de la superficie, si por el contrario B es pequeño, los impulsos de atracción predominantes son de Van der Waals y capaces de llegar a grandes distancias de la superficie.

Siendo A, B constantes que penden de la temperatura y naturaleza del fruto, presentando de esta manera la siguiente ecuación:

$$a_w = \exp \left[\frac{-A}{X_e^B} \right] \quad (4)$$

1.6.6.4. Modelo de Oswin (1946)

El modelo Oswin es empírico, basado en la expresión matemática para la curva de forma sigmoidea, y se acuerda entre $0,0 < a_w < 1,0$. Con dos constantes es de fácil linealización, mostrando las ventajas respecto a los modelos cinéticos GAB y BET (**Chinnan & Beauchat, 1985**). Según **Lomauro (1985)**, citado por **Lima (2006)**, que este modelo se ajusta alrededor del 57% de las isothermas de los alimentos. Esta ecuación fue utilizado por **Boquet et al. (1978)** para treinta y nueve productos y es apropiada para alimentos con valioso contenido de almidón, además de ser considerado una de las más versátiles ecuaciones de dos parámetros.

$$X_e = A \left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^B \quad (5)$$

Dónde:

X_e = Humedad de equilibrio.

a_w = Actividad de agua.

A y B = Parámetros de ajuste del modelo.

1.6.6.5. Modelo de Henderson

El modelo empírico de Henderson es uno de los más empleados y describe bien el comportamiento de alimentos tales como granos, cereales y frutas, en un amplio rango de actividad de agua (0.10 a 0.75) (**Kurozawa, 2005**).

$$1 - a_w = \exp(-kX_e^n) \quad (6)$$

Donde k y n son constantes características del modelo, que dependen de la naturaleza del producto.

1.6.7. CALIDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMATICOS

Los criterios utilizados para determinar el mejor contrato de los modelos a los datos empíricos son: el coeficiente de determinación (**R²**), el desvió porcentual medio (**P**), el error estándar de humedad (**SEM**) y la verificación del procedimiento de la distribución de los residuos, son medidas estadísticas largamente manipulados por diversos autores en la determinación de isotermas de alimentos (**Duarte, 2008; Iguedjtal et al., 2007; Resende et al., 2006; Arslan y Togrul, 2006; Siripatrawan y Jantawat, 2006; Correa et al., 2005; Araujo, 2001; Yu et al., 1999**).

El cálculo del desvió porcentual medio (**P**) y el error estándar de humedad (**SEM**) se realizan mediante las ecuaciones 8 y 9 respectivamente. $X_{ei} - X_{ci}$

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \quad (7)$$

$$SEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{ei} - X_{ci})^2}{N-n}} \quad (8)$$

Dónde:

- X_{ei} = Contenido de agua de proporción empírico (g agua/gm.s.)
 X_{ci} = Contenido de humedad de proporción deducida a partir de cada Tipo (g agua/g m. s.).
 N = Número con puntos experimentales
 n = Número de constantes en el modelo

Wang y Brennan (1991), citado por **Fandini et al. (2006)**, consideran que valores del parámetro P por debajo del 10% indican un ajuste razonable de los datos experimentales a los modelos; así mismo **Resende et al. (2006)** indica que los modelos que presentan mejor ajuste son aquellos que exhiben un mayor R^2 y un menor valor de **SEM**.

En cuanto a la distribución de los residuos, **Duarte (2008)**, menciona que un modelo es considerado aceptable si la distribución de los residuos es aleatoria, mientras que si la distribución de los residuos es tendenciosa, el modelo es considerado inadecuado para representar el fenómeno en cuestión.

1.6.8. METODOS DE MEDICION DE ISOTERMAS DE SORCION

La bibliografía hizo una clasificación de las técnicas para el control de las isothermas de sorción de toda clase de materiales sólidos (Tabla N° 02). Las isothermas de sorción pueden ser determinadas de acuerdo a dos principios básicos: el gravimétrico y el manométrico o higrómetro.

El principio del método gravimétrico es la determinación de variaciones en el peso de las muestras en equilibrio con diferentes presiones de vapor de agua.

Numerosos laboratorios vienen usando el método gravimétrico estático por ser la técnica más simple, a pesar de la demora en su determinación. La humedad de equilibrio entre el producto y la atmósfera circundante es alcanzada sin movimiento del aire. En el método dinámico el aire o el producto permanecen en movimiento hasta que se alcance el equilibrio. El método manométrico es utilizado en procesos de control de calidad, para la determinación rápida de la actividad de agua. Los métodos especiales, son métodos no convencionales que utilizan una membrana de célula de presión, para determinar la actividad de agua en materiales con alto contenido de humedad. **Gal (1975)**, citado por **Feitosa (1998)**.

Tabla N° 02: **Métodos para la determinación de las isotermas de sorción.**

1. Métodos gravimétricos

- 1.1. Método con registro continuo de cambios de peso
 - a) Sistemas al vacío.
 - b) Sistemas dinámicos.
 - 1.2. Método con registro discontinuo de cambios de peso
 - a) Sistemas estáticos.
 - b) Sistemas dinámicos.
 - c) Sistemas al vacío.
-

2. Métodos manométricos o higrómetros

- 2.1. Métodos manométricos
 - 2.2. Métodos higrométricos
-

3. Métodos especiales

Fuente: **Gal (1981)**, citado por **Feitosa (1998)**.

1.7. CALOR ISOSTERICO DE SORCION

El calor isostérico es una medida considerable de utilidad en los métodos de adsorción y desorción de agua en alimentos (**Vega et al., 2006**). Según **Wang y Brennan (1991)**, citado por **Duarte (2008)**, indican al calor de adsorción como una

medida de la energía libre en la sorción de agua por el producto, mientras que el calor de desorción representa el requerimiento de energía necesaria para arrancar las fuerzas intermoleculares de las moléculas de vapor de agua y el área adsorbente. Así, el calor de sorción es considerado un indicador de las fuerzas intermoleculares de afinidad entre los locales de sorción y el vapor de agua.

El calor isostérico neto de sorción (q_{st}) es definido como el calor general de sorción de lluvia del alimento (Q_{st}) salvo el calor de evaporación de agua pura (λ), a un explícito clima. Una regla ampliamente utilizado para deducir el calor isostérico de sorción, es el proceso de adhesión o para el de desorción, está determinado en una igualdad de Clausius y Clapeyron (Ecuación 10) (**Telis-Romero et al., 2005**).

$$\left. \frac{\partial \ln(P/P_0)}{\partial(1/T)} \right|_X = \left. \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial(1/T)} \right|_X = -\frac{Q_{st} - \lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (9)$$

Dónde:

Q_{st} =Calor isostérico total de sorción (KJ/mol).

q_{st} =Calor isostérico neto de sorción (KJ/mol).

λ = Calor de vaporización del agua pura (KJ/mol).

R =Constante universal de los gases, $8.314 \text{ KJ}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Integrando la ecuación y asumiendo que el calor isostérico líquido de sorción es autónomo del clima, se tiene la siguiente expresión:

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} \Big|_X = \frac{q_{st}}{R} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (10)$$

Donde a_{w1} y a_{w2} son las actividades de agua a las temperaturas T_1 y T_2 (K), respectivamente al contenido de humedad.

Empíricamente, para valorar y alcanzar el valor de (q_{st}) las isothermas de adsorción se deben evaluar a diferentes temperaturas, graficando $\ln(a_w)$ vs. $1/T$, a sus

relativas humedades (Figura 6), habiendo la pendiente $-q_{st}/R$, citado por **Choque, 2009**).

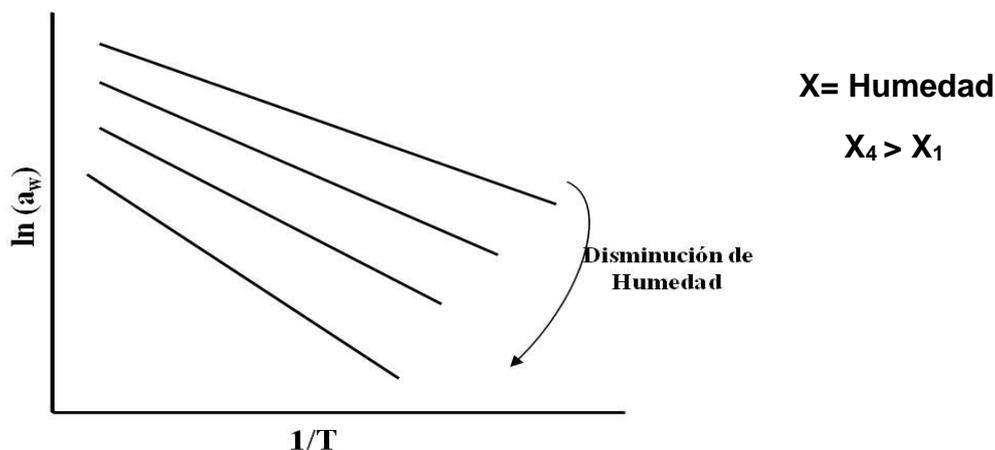


Figura 04: **Relación de Clausius – Clapeyron para distintos contenidos de humedad.**

Fuente: **Barbosa-Canovas y Vega-Mercado (2000)**.

Tsami et al. (1990), la comprensión del sometimiento del calor de sorción del agua al punto del comprendido de agua es básico para el artículo de diferentes métodos alimentarios, pudiendo ser usado para estimar las necesidades energéticas del proceso de secado, además de proporcionar datos importantes sobre el cambio del agua en los servicios alimenticios. Es así que **Tsami et al.** (1990) utilizan la siguiente correlación exponencial experimental entre la excitación de sorción y el comprendido de agua para frutas secas, propuesta de la siguiente forma:

$$q_{st} = q_0 \exp\left(\frac{-X_e}{X_0}\right) \quad (11)$$

Dónde:

q_0 = Calor isostérico de sorción de la primera molécula de agua (kJ/mol)

X_e = Contenido de agua de equilibrio "(g agua/g m.s.)".

X_0 = Contenido de humedad inicial del material alimenticio (a agua/g m.s)

1.8. ENERGIA DE ACTIVACION

Una de las más importantes particularidades de un adsorbente heterogéneo es su topografía (la manera en la que los diferentes sitios de adsorción son distribuidos sobre la superficie). Dos modelos son considerados generalmente, el primer modelo ha sido propuesto por Langmuir, que asumió que la superficie está compuesta por dominios isótropos que constan de los mismos sitios de adsorción, de acuerdo con este modelo, los procesos de adsorción que ocurren sobre los diferentes sitios activos están totalmente correlacionados; el otro modelo, de la superficie, supone que en la topografía de los sitios las diferentes energías están totalmente distribuidas al azar en toda la superficie heterogénea (**Zug, 2002b**)

Estos lugares activos se encuentran separados por barreras (topografía de la superficie), siendo cada lugar un sitio de adsorción, que presenta profundidades mínimas. Para que el adsorbato migre de este lugar (monocapa), se requiere energía de activación (**Toth, 2001**, citado por **Choque, 2009**).

En los alimentos la higroscopicidad se ve afectada por algunos parámetros como la temperatura, presión y potencial químico (**Heldman y Lund, 2007**, citado por **Choque, 2009**). Durante la adsorción, las moléculas son ligadas a los sitios activos, a través de básculas de hidrogeno, y en algunos casos ocurriendo reacciones (**Vegaet al.,2006**).

Debido a que estas dislocaciones moleculares suceden por acción del calor, el resultado de la temperatura puede evaluarse a través de la ecuación de Arrhenius (**Heldman y Lund, 2007**, citado por **Choque, 2009**).

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (12)$$

Dónde:

D es la decidido en estudio; D_0 es el factor de Arrhenius, E_a es la energía de activación (kj/kmol); R es la constante universal de los gases y T es el clima absoluta (°K).

El sometimiento de la temperatura de las invariables fisicoquímicas más significativos (X_m , C_{GAB} , K_{GAB}) de la isoterma GAB, se pueden valorar con la igualdad de Arrhenius (Ecuación 13); consiguiendo de esta forma la energía de activación (E_a) que simboliza el carácter mingitorio para acoplar o rasgar la primera monocapa de agua entre el método solido-agua, donde la alineación de la escritura solido-agua (adsorción) solicita de mayor energía para desgarrar tal unión (desorción) (Vega *et al.*,2006).

1.9. ALMACENAMIENTO

Las frutas, hortalizas, tuberculos, raíz es y granos, son productos que se pueden deteriorar rápidamente una vez cosechados, los cuales si no se someten a un tratamiento adecuado para su conservación, pueden parecer y con ello perder la calidad y su valor comercial (Ospina y Aldana, 1995, citado por Choque, 2009).

Un adecuado mantenimiento pasa por una acumulación a la capa de la humedad, del oxígeno del aire y de la luz, que conmueve a los pigmentos y cataliza las oxidaciones (Casp, 2003, citado por Choque, 2009). El deterioro de los alimentos se ve influido por una sucesión de elementos ambientales, entre ellos la temperatura tanto de ingreso como de caída, que asociados a los otros factores causan la degradación de los alimentos en un determinado tiempo. Las influencias destructoras serán mayores, mientras mayor sea el tiempo de exposición del alimento a los factores de degradación (Casp, 2003, citado por Choque, 2009).

1.9.1. FACTORES QUE ALTERAN LOS ALIMENTOS ALMACENADOS

avalar una buena conservación de los productos agrarios es necesario tomar algunas medidas puesto que son seres vivos por lo tanto se lleva a cabo procesos fisiológicos, como la capacidad de respiración, por lo cual los elementos al ser lastimadas debido al||| oxígeno originan gas carbónico, agua y liberan energía (Dendy y Bobraszczyk, 2001, citado por Choque, 2009).

Los tres factores principales del almacenamiento que influye en la conservación de un determinado producto son la temperatura, la humedad y la composición de la atmosfera (**Brennan, 1980**).

A. TEMPERATURA

El efecto que producen en los microorganismos, el frio y el calor no vigilados logran producir detrimento en los alimentos (**Choque, 2009**).

La regularidad de las fuerzas bioquímicas es la situación del clima, de carácter que el clima de acumulación más descendes, la variación de los provisiones íntegro a perjuicios de inicio bioquímico se ralentiza, a la vez que reduce el desarrollo de microbios y hongos (**Brennan, 2008**, citado por **Choque, 2009**).

Según **Cheftel y Cheftel (2000)** Las variedades bacterianas se difundirse exclusivamente bajo ciertos términos de temperatura para su progreso, una clima adecuada. Para ello el clima de acumulación tiene un dominio considerable sobre la variación que pueda tolerar un alimento.

Considerando la temperatura en la que se desarrollan, se diferencian tres grupos de microorganismos que aquejan a los alimentos, la cual se muestra en la tabla 3.

Tabla 03: **Supervivencia al clima de las bacterias.**

Microorganismos	Temperatura de desarrollo °C		
	Minúscula	Optima	Máxima
Psicrofilo	-15	+10	+20 aprox
Mesofilos	+5 a +10	+30 a +40	+50 aprox
Termofilos	+ 40	+50 a +55	+65

Fuente: **Cheftel y Cheftel (2000)**.

Cada uno de los conjuntos se halla variedades con características termófilo, mesofilo o psicrofilo es preciso y otras en la cual es espontáneo; además los términos de temperatura son relativamente extensos; ciertos *Streptococcus* se despliegan entre 0 y 30°C.

Los datos son aptos, para ratificar que las posibles variaciones bacterianas que consiguieran mostrarse van a transformar según la temperatura de acumulación.

B. HUMEDAD RELATIVA

Cuando la humedad del contexto de acumulación sobrepasa la humedad referente de equilibrio (HRE) del alimento, manifiesta un desarrollo en la humedad y recíprocamente. La absorción de agua durante la conservación lleva asociada una mayor susceptibilidad al crecimiento de microorganismos, mientras que la pérdida de agua conduce a pérdidas económicas, así como a problemas más específicos como el resquebrajamiento de las cascaras de los cereales o de las pieles de las frutas y hortalizas (**Brennan, 2008**, citado por **Choque, 2009**).

Cuando la humedad del entorno actúa en el desarrollo de bacterias en el plano de los valores nutritivos; hay que tener en cuenta que transforma en empleo del clima y que por otra fracción hay predisposición a constituir una proporción entre la agua respectiva del ambiente y el movimiento de agua del fruto. Es necesario reconocer un constituyente que no logra suponer soberanamente de los otros (**Cheftel y Cheftel, 2000**). Lo más perfecto es considerar, la humedad de acumulación correspondería ser similar al agua de medida del alimento (**Brennan, 2008**, citado por **Choque, 2009**).

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOS

2.1. LUGAR DE EJECUCION

La presente investigación, se llevó a cabo en la estancia Ambiental regional de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Entre los meses de Noviembre a Diciembre del 2014 se utilizó además el Laboratorio de Química, ambas patrimonio de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – Puerto Maldonado, entre los meses de Enero a Marzo del 2015. También, la última etapa de la indagación para obtener las deducciones del análisis proximal de la harina de castaña en el Laboratorio de estudio certificado por el organismo peruano de acreditación indecopi-SNA.CERPER, Callao- Perú, durante los meses de septiembre - octubre del 2014.

2.2. MATERIALES

2.2.1. Materia prima

Respecto al material utilizado en la presente investigación fue la castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K*), conocido popularmente con el nombre de “castaña”, que es utilizado permanentemente en nuestros principales mercados de abasto para la preparación de ají típico de la región y para la panadería en el área de la pastelería. El material de estudio fue cosechado del predio perteneciente a la familia Zamalloa Bermudez ubicado en la provincia de Tahuamanu distrito de Iberia de la comunidad de Alerta a 12 Km de la ciudad de Iberia – Madre de Dios.

2.2.2. Reactivos (Sales)

- Cloruro de Litio (LiCl)
- Acetato de Potasio (KC₂H₃O₂)
- Cloruro de Magnesio (MgCl₂)
- Nitrato de Magnesio (Mg (NO₃)₂)

- Nitrato de Sodio (NaNO_3)
- Cloruro de Sodio (NaCl)
- Cloruro de Potasio (KCl)
- Carbonato de Potasio (K_2CO_3)

2.2.3. Equipos de laboratorio.

- Estufa, Marca MENMERT, modelo UNE- 400, precisión $\pm 0.5^\circ\text{C}$
- Estufa $T^\circ 0-200^\circ\text{C}$, Marca TOMOS, modelo ODHG-9053A precisión $\pm 1^\circ\text{C}$
- Balanza de precisión, marca TETTLER TOLEDO, rango: 0.2 g – 2100 g. precisión ± 0.1 g
- Balanza analítica, marca OHAUS ADVENTURER, modelo AR 2140, rango: 0-210 g., precisión ± 0.0001 g.
- Balanza analítica, marca AND, modelo HR-200, rango: 0-210 g., precisión: ± 0.0001 g.
- Cámara digital, marca CANON modelo POWER SHOT-115 IS

2.2.4. Materiales

- Frascos de vidrio.
- Placas petri, marca KIMBLE USA.
- Recipientes de plástico (Taper) de 500ml, marca M&R
- Termómetro de mercurio (rango: $0-100^\circ\text{C}$).
- Probeta de 100 ± 1 ml. marca: GIARDINO Italy
- Piceta con agua destilada.
- Bandejas de malla metálica.
- Pinzas.
- Espátulas.
- Jeringa descartable de 5ml.
- Guantes quirúrgicos.
- Mascarillas.
- Toca.
- Bolsas de polietileno.

- Campana desecadora.
- Lentes de seguridad, marca KAMASA.

2.2.5. Soluciones químicas de desinfección

- Hipoclorito de sodio al 7.5%
- Alcohol etílico de 98°, Laboratorios LACOPPER S.A.C.
- Formol al 40%, Laboratorio LA COPPER S.A.C.

2.3. METODOLOGIA

2.3.1. Caracterización de la materia prima

El análisis proximal de la muestra de harina de castaña, se solicitó el servicio del Laboratorio de Cerper – Callao. Los análisis realizados y sus respectivas normas de determinación son mostrados en la tabla.

Tabla04. **Características de análisis fisicoquímicos ejecutados en la harina de Castaña y sus relativas normas de determinación**

ANALISIS	NORMA
HUMEDAD	OAC 925.10
PROTEINA	NTP 205.042
GRASA	NTP 205.041
CENIZA	AOAC 923.03
PH	AOAC 981.12
CALORIAS	Calculado
ACIDEZ	NTP 205.039
CARBOHIDRATOS	Calculado

Fuente: **Laboratorio CERPER – Callao**

2.3.2. Flujograma para la obtención de la harina de castaña.

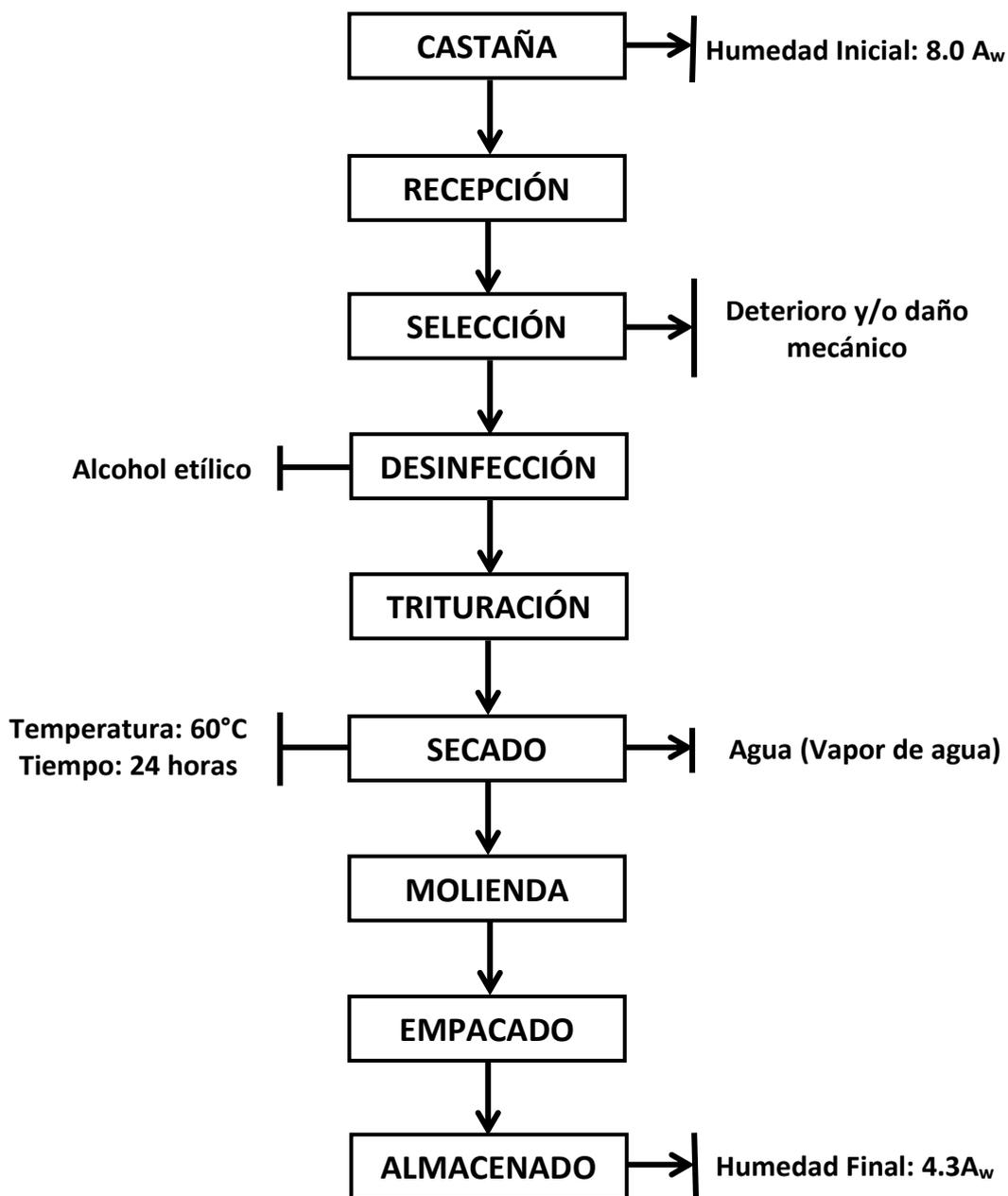


Figura 05: Obtención de la harina de castaña.

Fuente: Elaboración propia (2015)

2.3.3. Acondicionamiento de lá muestra

El actual trabajo de investigación, se realizó el secado de la muestra harina de castaña en una estufa (marca ODHG-9053A) con circulación de aire, a continuación se muestra la descripción detallada de los procedimientos que fueron realizados para obtener la harina de castaña que vendría a ser la muestra de estudio del presente trabajo.

Materia Prima.

Las castañas empleadas para esta investigación fueron adquiridas de la provincia de Tahuamanu distrito de Iberia de la comunidad de alerta a 12 km de la ciudad de Iberia.

Selección.

La selección consistió en eliminar los productos que no mostraron condiciones adecuadas para el proceso tales como frutos con daño mecánico, inicio de deterioro es así que solo se procesan frutos sanos (denotados por un color característico).

Desinfección.

Para la desinfección se utilizó alcohol etílico al 96° de pureza.

Triturado.

Luego se procede a cortar la castaña en tajadas (hojuelas) de 0.5 a 1 milímetro de espesor con una refinadora de acero inoxidable ubicada en la Planta piloto de frutas tropicales de la UNAMAD.

Secado.

La operación de secado se realizó con el fin de remover el agua contenida en la muestra de castaña, lo cual minimiza el crecimiento de microorganismos y reacciones de deterioro químico. Teniendo una humedad inicial de 8.0, el secado se llevó según lo recomendado por **Dorantes et al. (2007)** a una temperatura de 60°C, el cual se realizó en una estufa (TOMOS, modelo ODHG-9053A) con circulación de aire durante 24 horas.

Molienda.

El molido y pulverizado de las hojuelas secas de castaña. Se realizó en un molino con tornillo sinfín, teniendo una granulometría (anexo 08).

Empacado.

El envasado de la harina de castaña se realizó manualmente, teniendo en cuenta los cuidados e higiene al respecto.

Almacenado.

La muestra seca de harina de castaña, fueron almacenadas en frascos de vidrio herméticamente cerradas y cubiertas con bolsas luminizadas, posteriormente colocadas en un ambiente fresco, seco y al resguardo de la luz hasta su utilización para determinar las isotermas de adsorción.



Figura 06: **Muestra de harina de castaña almacenada en envase de vidrio cubierto con bolsa aluminizada.**

Fuente: **Elaboración propia (2015)**

Isotermas de adsorción

La técnica residió en dejar en medida una masa destacada de ejemplo (en quintuplicado) con el ambiente, en un depósito cerrado hermético, el cual domina un vaso con disolución repleta de sal de presteza de agua conocida (Tabla 04).

Se registró el peso del prototipo según indica el procedimiento estático gravimétrico o método continuo de permutas de peso, explicados por **Jowitt et al. (1983)**, citado por **Gabas (1998)**; control que se llevaba a cabo diariamente hasta alcanzar un peso constante (condición de equilibrio).

Las humedades relativas fueron obtenidas con soluciones salinas saturadas que cubren un nivel de movimiento de agua (a_w) de 0.11 a 0.85, (Tabla 05) que pueden ser calculadas a partir de las ecuaciones de regresión, determinadas por **Labuza et al. (1985)**, citado por **Gálvez (2006)**.

Tabla 05: **Variación de las humedades relativas de equilibrio (%) en función de las tres temperaturas utilizadas en el experimento.**

Nomenclatura	Sal	Humedad relativa (%)		
		30°C	40°C	50°C
Cloruro de Litio	(LiCl)	11.11	10.53	10.03
Acetato de Potasio	(KC ₂ H ₃ O ₂)	22.57	20.61	18.93
Cloruro de Magnesio	(MgCl ₂)	32.32	31.31	30.38
Carbonato de Potasio	(K ₂ CO ₃)	43.27	43.30	42.68
Nitrato de Magnesio	(MgNO ₃)	52.53	50.60	48.84
Nitrato de Sodio	(NaNO ₂)	64.28	61.39	58.81
Cloruro de Sodio	(NaCl)	75.21	73.42	71.78
Cloruro de Potasio	(KCl)	83.74	80.56	77.68

Fuente: **Labuza et al. (1985)**, citado por **Pedroso (1997)**.

Tabla 06: **Salas y ecuaciones manejadas para lograr la a_w o humedad relativa (%) a una temperatura ($^{\circ}\text{K}$) definitiva.**

Nomenclatura	Sal	Ecuación de regresión	r^2
Cloruro de Litio	(LiCl)	$\ln a_w = (500.95 - 1/T)$	0.976
Acetato de Potasio	($\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$)	$\ln a_w = (861.391/T)$	0.965
Cloruro de Magnesio	(MgCl_2)	$\ln a_w = (303.35 - 1/T)$	0.995
Carbonato de Potasio	(K_2CO_3)	$\ln a_w = (145.00 - 1/T)$	0.967
Nitrato de Magnesio	(MgNO_3)	$\ln a_w = (356.60 - 1/T)$	0.987
Nitrato de Sodio	(NaNO_2)	$\ln a_w = (435.96 - 1/T)$	0.974
Cloruro de Sodio	(NaCl)	$\ln a_w = (228.92 - 1/T)$	0.961
Cloruro de Potasio	(KCl)	$\ln a_w = (367.58 - 1/T)$	0.967

Fuente: **Labuza et al. (1985)**, citado por **Pedroso (1997)**

Las isotermas de adsorción fueron determinadas a los climas de 30°C , 40°C y 50°C , con el fin de conseguir las humedades de equilibrio de las muestras para cada una de las temperaturas.

Se acondicionaron 08 frascos de vidrio con tapa hermética, en cada uno de los frascos se colocó internamente un pote de plástico (taper) que sirvió de soporte para los recipientes de vidrio (placas petri) donde fueron colocadas las muestras. Primeramente los frascos de vidrio y los potes de plásticos fueron limpiados con una solución de formol al 40%, a fin de evitar potenciales contaminaciones y el desarrollo de microbiano en las muestras, especialmente el enmohecimiento; así mismo las placas Petri fueron limpiadas con alcohol etílico de 96° y posteriormente esterilizadas a 160°C por 3 horas.

Las soluciones salinas saturadas fueron preparadas de acuerdo a las cantidades de sal (g) y agua (ml) recomendados por **Wolf et al. (1985)**, citado por **Díaz (2002)**, el cual se muestra en la tabla 07.

Tabla 07: **Cantidad de sal y agua recomendadas para la preparación de Soluciones salinas saturadas.**

Nomenclatura	Sal	Cantidad de preparación	
		Sal (g)	Agua(ml)
Cloruro de Litio	(LiCl)	150	85
Acetato de Potasio	(KC ₂ H ₃ O ₂)	200	65
Cloruro de Magnesio	(MgCl ₂)	200	25
Carbonato de Potasio	(K ₂ CO ₃)	200	90
Nitrato de Magnesio	(MgNO ₃)	200	50
Nitrato de Sodio	(NaNO ₂)	200	30
Cloruro de Sodio	(NaCl)	200	60
Cloruro de Potasio	(KCl)	200	80

Fuente: **Wolf et al. (1985)**, citado por **Díaz (2002)**

Seguidamente en cada frasco de vidrio fue colocado un tipo de solución salina saturada, con tres gotas de formol, seguidamente se introdujeron los potes de plástico que sirvieron para sostener a las placas petri con las muestras. Se pesaron por quintuplicado los modelos de cerca de 2 g de harina de castaña en las placas petri, para luego ser introducidas dentro de frascos de vidrio que permanecieron cerrados y se pusieron en la estufa (marca MENMERT, modelo UNE- 400) a las temperaturas de 30°C, 40°C y 50°C respectivamente.

Las muestras fueron pesadas periódicamente cada 24 horas en una balanza analítica (Marca AND, modelo HR- 200, de precisión ± 0.0001 g y Marca OHAUS ADVENTURER, modelo AR 2140, de precisión ± 0.0001 g) hasta que presenten un peso constante, momento en el cual alcanzan el equilibrio con su ambiente que se supone cuando la discrepancia entre dos pesadas inmediatas fuese igual o inferior a 0.001 g tal como lo recomienda **Gabas et al. (2009)**.

2.3.4. Determinación de la humedad de equilibrio (X_e)

Está presente saturación de medida fue determinada por la discrepancia entre la multitud del modelo en medida y su muestra seca, tal como lo describe.

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (13)$$

Dónde:

X_e = Agua de medida (g. agua/g m.s.).

m_{eq} = Masa del modelo en la medida (g.).

m_s = Masa del modelo seco (g).

La determinación de humedad de las muestras se realizó con la técnica de estufa a 105°C por 24 horas hasta una cuenta entero. Las placas son tapadas al momento de pesar para evitar la ganancia de humedad del medio ambiente. Los valores de humedad de equilibrio deducidos fueron realizados para cada una de las placas petri, obteniéndose por último la media aritmética de las cinco repeticiones para cada solución salina saturada.

2.3.5. Ajuste matemático de las isotermas de adsorción

Estos resultados empíricos del agua de medida estuvieron precisos a los modelos matemáticos de GAB “(Guggenheim, Anderson y de Boer), BET (Brunauer, Emmett y Teller), Halsey, Oswin y Henderson” (Ecuaciones 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente), los cuales son frecuentemente utilizados para la representación de la higroscopicidad de productos agrícolas.

Los modelos matemáticos fueron resueltos utilizándose el software estadístico STATISTICA para Windows versión 8.0 y comprobado por el programa Microsoft Excel método solver, a través del estudio de regresión no rectilíneo estimado con el procedimiento Quasi-Newton, con un número máximo de 500 interacciones y un criterio de convergencia de 0.0001. Los ajustes fueron realizados a un nivel de significancia del 5%.

Los razonamientos utilizados para valorar la disposición de acuerdo de los modelos de isotermas a los datos empíricos fueron, el coeficiente de determinación (R^2), el

desvió porcentual medio (**P**) (Ecuación 8), el error estándar de humedad (**SEM**) (Ecuación 9) y la verificación del comportamiento de la distribución de los residuos.

2.3.6. Determinación de la monocapa del modelo de GAB

La monocapa X_m , se estableció cuando fue precisa la isoterma de GAB (ecuación 3), con temperaturas de 30°C, 40°C y 50°C, la determinación fue realizada a través de una regresión no lineal, utilizando el software estadístico STATISTICA para Windows versión 8.0 y Microsoft Excel método solver para comparar los resultados

2.3.7. Determinación del calor isostérico de adsorción (q_{st})

Con las isotermas de adsorción construidas para la harina de castaña y ajustadas por el modelo de Halsey, se determinó el calor isostérico de adhesión en situación de la relente de equilibrio (X_e) de la harina de castaña. La intención de este estudio fue analizar los parámetros energéticos en la adsorción de agua por la materia prima, el cual provee una información importante a cerca del mecanismo de adsorción e interacción entre los componentes del producto y el agua. El calor isostérico de adhesión (q_{st}) fue calculado con la igualdad de Clausius-Clapeyron (Ecuación 10).

Para un intervalo de saturación de medida (X_e) de 0.06 a 0.32 g agua/g m.s. fueron calculadas las actividades de agua (a_w), utilizando las ecuaciones de regresión de Halsey. La regresión lineal del logaritmo natural de las actividades de agua, $\ln(a_w)$ versus el inverso del clima en grados Kelvin, $1/T$, fue q_{st} correspondió al coeficiente angular de cada recta, multiplicada por la constante universal de los gases R (8.314 kJ kmol⁻¹ K⁻¹). En seguida los datos del q_{st} y las diferentes X_e fueron ajustados a la ecuación exponencial de **Tsami et al. (1990)** (Ecuación 12), con ayuda del software estadístico STATISTICA para Windows versión 8.0 y el método solver de Microsoft Excel, calculándose los parámetros q_0 y X_0 para la harina de castaña.

2.3.8. Determinación de la energía de activación (E_a)

La energía de aceleración fue determinada a través de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 12), para lo cual se graficó el logaritmo natural de la constante en estudio (X_m , C_{GAB} , K_{GAB}) versus el inverso de la temperatura en kelvin, es decir $\ln(D)$ vs $(1/T)$, siendo la pendiente $-E_a/R$, realizándose posteriormente una correlación de los datos a fin de determinar el valor del factor de determinación (R^2).

Los productos de las constantes de GAB, fueron reemplazados en lugar de la constante D de la igualdad de Arrhenius, es así que el valor de la E_a tomo diferentes valores cuando fue determinado para cada uno de las constantes.

En la Figura 07. Se muestra el diagrama de flujo seguido en este trabajo, para la determinación de las isothermas de adsorción de harina de castaña.

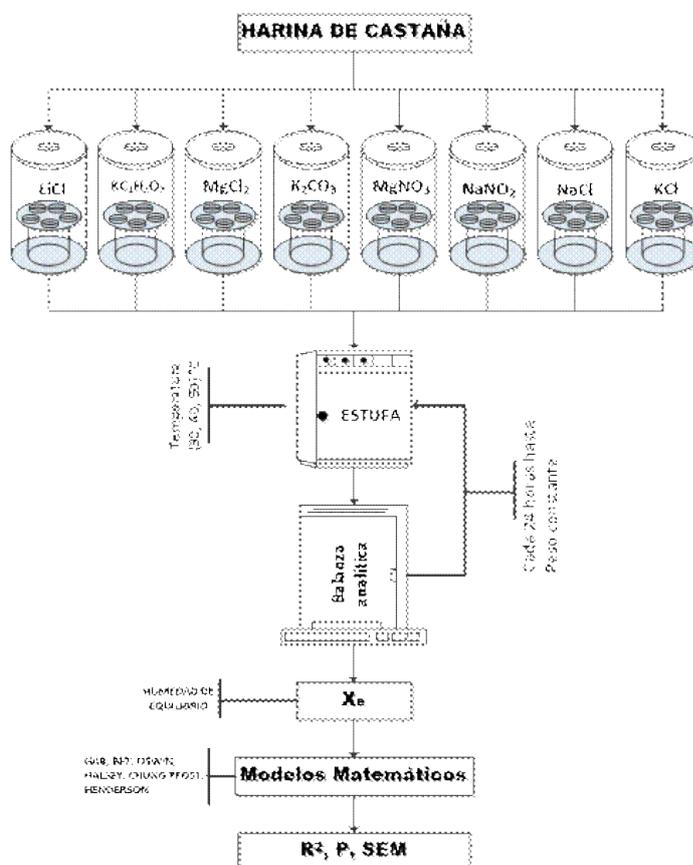


Figura 07: Diagrama de flujo del valor de las isothermas de adhesión de la harina de castaña

Fuente: Elaboración propia (2015)

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Las consecuencias del estudio químico proximal de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K.), son presentados en la tabla (08)

Tabla 08: **Composición fisicoquímica de la harina de castaña** (*Bertholletia excelsa* H.B.K).

ANALISIS	VALOR
HUMEDAD (%)	4.01
PROTEINA (%)	30.56
GRASA (%)	44.91
CENIZA (%)	6.37
PH	6.09
CALORIAS (Kcal/100)	583.03
ACIDEZ (% Ac.Citrico)	0.17
CARBOHIDRATOS (%)	14.15

Fuente: **Laboratorio de ensayo (CERPER) autorizado por el organismo peruano De acreditación INDECOPI- SNA**

En la tabla 08 se puede apreciar que la harina de castaña (*Bertholletia excelsa* HBK) es un producto con bajo contenido de humedad 4.01% en base seca sobre 100 gramos de harina este valor es similar al contenido de humedad de otras harinas (cacao 4.8%; tarwi 5.2%; café 5.4%) y elevados valores de proteína, calorías y otros el porcentaje de estos componentes y los obtenidos para grasa, ceniza y calorías (Kcal/100) en el presente trabajo, son mayores a los reportados por **Antunes** (1997).

3.2. .HUMEDAD DE EQUILIBRIO

El agua originaria de las muestras de harina de castaña se determinó por el método sugerido por la AOAC, técnica 934.06, presentando un valor de 4.39g agua/100g

de muestra seca (m.s.). Los datos empíricos de la humedad de equilibrio (x_e) se obtuvieron en situación de la actividad de agua (a_w) a los climas de estudio de 30°C, 40°C, 50°C, y son mostrados en la tabla 09. Los valores del peso en el equilibrio (x_e) se alcanzaron a los 27, 19 y 15 días para las temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C respectivamente.

TABLA 09: Valores de humedad de medida, x_e (g agua/g m.s.) experimental de las muestras secas de harina de castaña en ocupación de la rapidez del agua (a_w) a las temperaturas de estudio.

SOLUCION SALINA SATURADA	A 30°C		A 40°C		A 50°C	
	a_w	$X_e(\text{b.s})^a$	a_w	$X_e(\text{b.s})$	a_w	$X_e(\text{b.s})$
(LiCl)	0.1111	0.0784	0.1053	0.0672	0.1003	0.0582
($\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$)	0.2257	0.0948	0.2061	0.0811	0.1893	0.0632
(MgCl_2)	0.3232	0.1049	0.3131	0.0836	0.3038	0.0722
(K_2CO_3)	0.4397	0.0993	0.4330	0.0941	0.4268	0.0787
(MgNO_3)	0.5253	0.1645	0.5060	0.0988	0.4884	0.0843
(NaNO_2)	0.642	0.1976	0.6139	0.1543	0.5881	0.1253
(NaCl)	0.7521	0.2891	0.7342	0.2346	0.7178	0.2574
(KCl)	0.8374	0.3998	0.8056	0.3470	0.7768	0.7322

a: Promedio de las cinco replicas

Fuente: elaboración propia

En la tabla 09 se mira como la humedad de equilibrio amplía con la elevación de la actividad de agua (a_w), demostrando la higroscopicidad de las muestras, así mismo se puede apreciar que la saturación de medida se reduce con el aumento de la temperatura de 30°C a 50°C, siguiendo la misma tendencia de la mayoría de los producto agrícolas agrícolas (**Saravacos et al., 1986; Tsami et al. , 1990; Ferreira y Pena, 2003; Kurozawa et al. , 2005; Telis – Romero et al. , 2005; Resende et al, 2006; Nascimento, 2006; Duarte, 2008; Oliveira et al. , 2009; Marques, 2009; Alakali et al. , 2009**).

Según **Rizvi (2005)**, citado por **Leal (2010)**, la disminución del contenido de rocío de medida con el incremento del clima en los procesos de sorción, está relacionado a los cambios energéticos del sistema, indicando que el aumento de la temperatura,

torna termodinámicamente menos estable las moléculas de agua, es decir, aumenta el grado de desorden molecular del agua sorbida en la superficie del sólido, llegando a mayores niveles de energía, favoreciendo de esa manera la disolución de la ligación intermolecular entre el agua y los sitios de sorción, reduciendo el comprendido de agua del producto. A medida que la temperatura varía, la excitación de las moléculas, así como la distancia y por consiguiente, la sugestión entre las moléculas, también varía. Eso hace que la cantidad de agua sorbida cambie a medida que ocurre una variación en la temperatura a una determinada humedad relativa.

3.3. ISOTERMAS DE ADSORCION

La representación gráfica de los antecedentes experimentales de la humedad de medida (X_e) con empleo de la actividad de agua (a_w) para los tres climas de estudio (tabla 09) puede ser apreciado en la figura (08); en esta figura se observa que todas las isotermas presentaron un procedimiento del tipo III, de pacto con la codificación de las isotermas de Van der Waals(**Shafiur, 2003** citado por **Choque, 2009**).El tipo III de isoterma es típica de alimentos con contenido de carbohidratos y sales (tabla 08)

El comportamiento del tipo III de isoterma también fue observado en productos como jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco (**Alakali et al., 2009**), huasai (*Euterpe oleracea Mart.*) y copoasu (*Teobroma grandiforum Schum.*) en polvo (**Eluan et al., 2008**), harina de pijuayo (*Bactris gasipaes*) (**Ferreira y Pena, 2003**), pulpa de lulo (*Solanum quitoense Lam.*) en polvo (**Gabas et al., 2009**),carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*) deshidratado osmóticamente con soluciones de NaCl al 10% y 30% (**Molina-Filho et al., 2006**). hongos comestibles (*Agaricus blazei*) in natura y deshidratados osmóticamente (**Kurosawa, 2005**), pulpa de maracuyá (*Passiflora eduli*) en polvo (**Marques et al., 2010**), pulpa de piña (*Ananas comosus*) en polvo (**Gabas et al., 2007**), pulpa seca de mango (*Mangifera indica*) (**Telis-Romero et al., 2005**).

En la Figura 08 también puede apreciarse claramente lo antes mencionado, el dominio del clima en las isotermas de adsorción, donde el rocío de medida se reduce con el aumento de la temperatura.

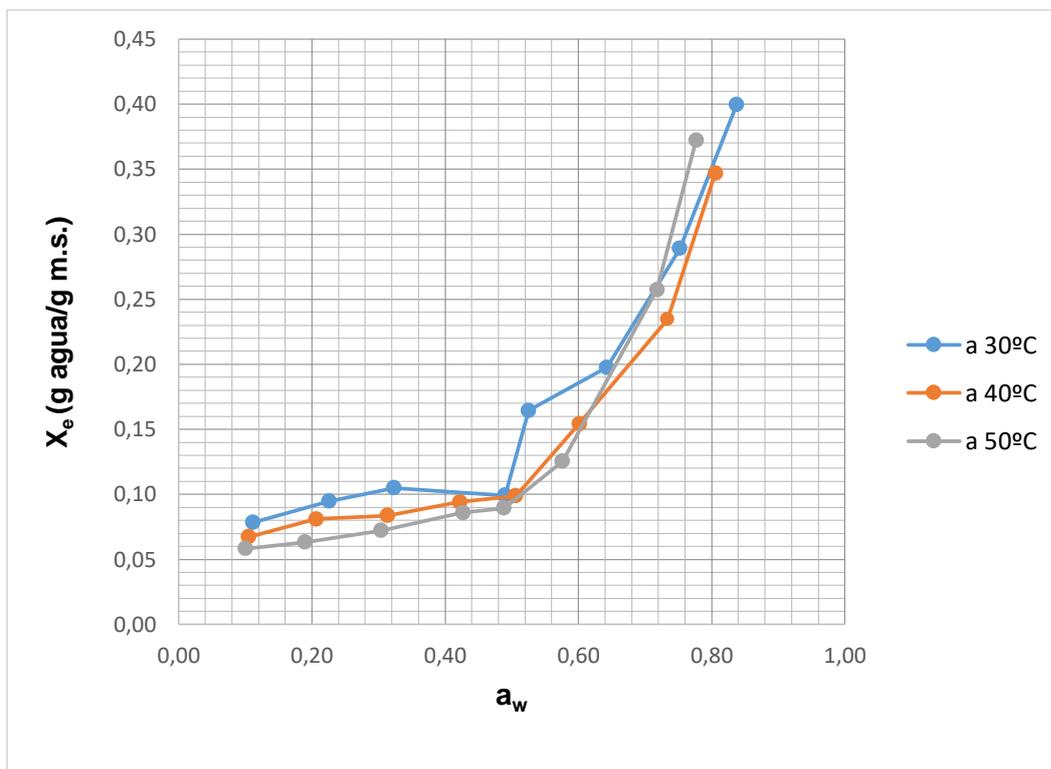


Figura 08: **Isotermas de adsorción para la harina de castaña (*Bertholletia excelsa* H.B.K) a las temperaturas de estudio.**

Fuente: **Elaboración propia (2015)**

3.4. AJUSTE DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCION.

Para predecir el comportamiento de adhesión de humedad en la harina de castaña (tabla 9), cinco modelos ampliamente utilizados en isotermas de alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, y Henderson), ecuaciones 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente) fueron ajustados a los antecedentes empíricos de humedad de equilibrio (X_e) en cargo de la actividad de agua (a_w).

En las tablas 10, 11 y 12 son mostrados los parámetros de los modelos, así como también los resultados del análisis estadístico que son el coeficiente de determinación (R^2), el desvío porcentual medio (P), el error estándar de humedad (SEM) y la distribución de los residuos, para la harina de castaña.

Tabla 10. Parámetros de ajuste de las isotermas de adsorción de la harina de castaña para los dispares modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), desvío porcentual medio (P), error estándar de humedad (SEM) y distribución de los residuos, a la temperatura de 30°C.

MODELO	PARAMETROS	R^2	P(%)	SEM	DISTRIBUCION DE LOS RESIDUOS
BET^b	X_m 0,0743	61,31	7,7731	0,0236	TENDENCIOSO
	C_{BET} 1803507				
GAB	X_m 0,0720	97,77	7,8838	0,0207	ALEATORIO
	C_{GAB} 170,3904				
	K_{GAB} 0,9820				
HALSEY	A 0.0518	97,25	10,8565	0,0204	ALEATORIO
	B 1,3412				
OSWIN	A 0,1491	95,35	16,8732	0,0264	LIGERAMENTE ALEATORIO
	B 0,5872				
	K 8,5954				
HENDERSON		82,44	44,6657	0,0687	TENDENCIOSO
	N 1,3603				

a: Los ajustes fueron estimados a un nivel de significancia del 5%

b: El rango de a_w para el patrón de BET fue de 0.11 – 0.45

c: El rango de a_w para el patrón de HENDERSON fue de 0.10 – 0.75

d: La estimados vs los valores residuales (anexo 03)

Fuente: elaboración propia (2015) evaluación de los residuos se realizó a partir de las gráficas de los datos

Tabla 11. **Parámetros de ajuste de las isothermas de adsorción de la harina de castaña para los dispares modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), desvío porcentual medio (P), error estándar de humedad (SEM) y distribución de los residuos, a la temperatura de 40°C.**

MODELO RESIDUOS	PARAMETROS	R^2	P(%)	SEM	DISTRIBUCION DE LOS
BET^b	X_m 0,0637	43,47	6,6807	0,0107	TENDENCIOSO
	C_{BET} 2904262				
	X_m 0,0550				
GAB	C_{GAB} 5821,92	99,20	6,4898	0,0103	ALEATORIO
	K_{GAB} 1,0450				
	A 0,061586				
HALSEY	B 1,147387	97,04	9,8434	0,0153	ALEATORIO
	A 0,125595				
OSWIN	B 0,673283	94,02	19,0390	0,0242	LIGERAMENTE ALEATORIO
	K 12,26318				
	N 1,41510				
HENDERSON		82,30	21,7854	0,0323	TENDENCIOSO

a: Los ajustes fueron estimados a un nivel de significancia del 5%

b: El rango de a_w para el modelo de BET fue de 0.11 – 0.45

c: El rango de a_w para el modelo de HENDERSON fue de 0.10 – 0.75

d: La estimados vs los valores residuales (anexo 04)

Fuente: elaboración propia (2015) evaluación de los residuos se realizó a partir de las gráficas de los datos

Tabla 12. **Parámetros de ajuste de las isotermas de adsorción de la harina de castaña para los dispares modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), desvío porcentual medio (P), error estándar de humedad (SEM) y distribución de los residuos, a la temperatura de 50°C.**

MODELO RESIDUOS	PARAMETROS	R^2	$P(\%)$	SEM	DISTRIBUCION DE LOS
BET^b	X_m 0,06682	91,04	5,66952	0,0086	TENDENCIOSO
	C_{BET} 3083592				
GAB	X_m 0,0463	99,43	8,43582	0,0123	ALEATORIO
	C_{GAB} 392,149				
	K_{GAB} 1,1290				
HALSEY	A 0,10559	97,22	8,28468	0,0139	ALEATORIO
	B 0,85699				
OSWIN	A 0,10988	94,65	23,4921	0,0257	LIGERAMENTE ALEATORIO
	B 0,94614				
	K 7,82444				
HENDERSON		79,67	51,8114	0,0802	TENDENCIOSO
	N 1,16433				

a: Los ajustes fueron estimados a un nivel de significancia del 5%

b: El rango de a_w para el modelo de BET fue de 0.11 – 0.45

c: El rango de a_w para el modelo de HENDERSON fue de 0.10 – 0.75

d: La estimados vs los valores residuales (anexo 05)

Fuente: elaboración propia (2015) evaluación de los residuos se realizó a partir de las gráficas de los datos.

El análisis de los parámetros que se encuentra en las tablas (10, 11, 12), indica que los modelos que mejor concuerdan a los datos experimentales son las isotermas de **GAB** y **HALSEY**, los cuales presentan un coeficiente de determinación R^2 mayor a 97,25% y 97,77% respectivamente, **P** (desvío porcentual medio) menores a 10,8565% y 7,8838% y **SEM** (error estándar medio) menores a 0,0207 y 0,0204 respectivamente, a temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C respectivamente; asimismo

las isothermas de **GAB y HALSEY** muestran una distribución aleatoria de los residuales para las tres temperaturas (anexo 3, 4, 5). Significando que los modelos modelan acogiendo de manera independiente o en conjunto a todos los datos del experimentos tanto en su humedad de medida en empleo de sus actividades de agua en las temperaturas de estudio. Lo cual no es lo mismo en los demás modelos presentando residuales ligeramente aleatorio (oswin), tendencioso (BET, Chung-Pfost, Henderson) (anexo 3, 4, 5).

Resultados similares al reportado en este trabajo fueron observados por Gabas (1998), quien al estudiar las isothermas de sorción de la pulpa y cascara de uva Italia, concluyo que los modelos más sobresaliente que mejor se ajustaron los datos empíricos fueron el de GAB y Halsey. Así mismo indico que no hubo diferencias en cuanto a valores calculados por ambos modelos. **Ccalli (2003)** en su investigación sobre el secado de higos (*Ficus carica L.*), también menciona que el tipo de GAB exhibo un excelente arreglo para los datos empíricos de las isothermas de adsorción de higo seco. **RESENDE (2006)**, basándose en parámetros estadísticos recomendó el modelo de Halsey para la predicción de las isothermas de sorción de los granos de frejol (***Phaseolus vulgaris L.***), evaluadas en rango de temperaturas de 30°C a 50°C. Así también **Sousa (2008)** al estudiar las isothermas de higo (*Ficus carica L.*) in natura y deshidratado osmóticamente, indico que los modelos de **GAB y Halsey** son los que excelentemente concordaron los datos empíricos con valores R^2 superiores al 97%. Del mismo modo. **Vega et al., (2006)** y **Choque (2009)** citado por **Ovalle (2015)**, concluyen que los modelos de GAB y Halsey modelaron correctamente los datos experimentales de adsorción en la harina de maíz (***Zea mays L.***) y en el maíz morado (*Zea mays L.*) diversidad "Canteño" respectivamente.

Las figuras 09 y 10 se observa el acuerdo de los datos empíricos de la harina de castaña a las diferentes temperaturas de evaluación mediante los modelos de GAB y Halsey. Así también las figuras 14, 15, 16. Muestran las coincidencias de ambos modelos en cuanto al ajuste de los datos experimentales en este trabajo, siendo ambos modelos generalmente manejados para narrar el proceder de sorción de cereales como el maíz, trigo, arroz, ajonjolí y frutas secas (*Choque 2009*). Por otra parte, el ajuste con todos los modelos de isothermas de este trabajo es mostrado en las figuras 11, 12, 13.

En el primer nivel de adhesión (monocapa) de agua, a descender a_w , el agua grafica una monocapa que establece envoltura conjuntos de ingreso carácter de enlace (del tipo $-\text{CO}$, COO^- y $-\text{NH}_3^+$) de los componentes hidrolíticos “(almidones, proteínas y pentosas)” de los cereales, a través de afinidades electrostáticas, enlaces dipolares y enlaces de hidrogeno (**Prieto. et al. 2006**), estribando de la apariencia de agujeros o estrechos en la superficie del adsorbente (**Hermida, 2000**). Este hecho se manifiesta en la región A, como se muestra en la figura 02 en la que se encuentra agua fuertemente ligada.

El parámetro C, (C_{GAB} y C_{BET}), denominado, la decidida energética, es una medida respectivo con la discrepancia de arresto de las moléculas de sorbato de la primera capa (monocapa) y las nuevas capas restantes (comportamiento líquido). (**Zug, 2002a**), manifiesta que la diferencia entre C_{GAB} y C_{BET} radica en que el modelo de BET considera que el estado de las moléculas de sorbato en la segunda capa y superiores son iguales entre sí, pero diferentes a aquellas del estado líquido. **Prieto et al. (2006)** citado por Choque (2009), menciona que C_{GAB} es invariable, k una invariable corregidora que representa las pertenencias de adhesión de lluvia más lejos de la monocapa.

En los cuadros (10, 11, 12), los valores de C_{GAB} es mayor a la unidad, esto indica que existe adsorción al horizonte de la monocapa, por lo que el adjunto de humedad en la monocapa se consigue de manera gradual durante los primeros días. Se puede decir que la harina de castaña tiene poca a regular afinidad de agua en comparación de otras harinas, pero es necesario tener las condiciones de almacenamiento para que el producto no sea vulnerable o propenso a ser atacado por mohos y levaduras.

Assis et al. (1998), encontraron valores de C_{GAB} , relativamente bajos (menores o iguales a la unidad) para ajonjolí, esto se debe a que el ajonjolí, tiene un bajo contenido de carbohidratos **Heldman y Lund (2007)**, reportan valores de C_{GAB} de adsorción para maíz laminado mayores a la unidad.

El hecho de que los valores de C_{GAB} , sean valores mayores a la unidad se puede deber a la topografía de la superficie de la harina de castaña, ya que el número de

centros activos puede ser mayor, con lo que las ligaciones de enlace de hidrogeno a grupos polares del tipo (-CO, -COO⁻ y -NH₃⁺) será mayor. Pero menor en consideración a otras harinas como el maíz.

Así mismo el parámetro k , presente en el modelo de GAB, acreditada como la cobertera firme, expresa la discrepancia de viable químico tipo entre los elementos del inferior curso y la etapa neto puro. Si k es mínimo a la módulo, se determinara una adhesión mínima a la señalada por **BET (Zug, 2002 a)**, este hecho se puede comprobar ya que X_m de GAB son menores a la unidad para los tres casos, asimismo los parámetros de GAB tienen aplicación en la energía de activación.

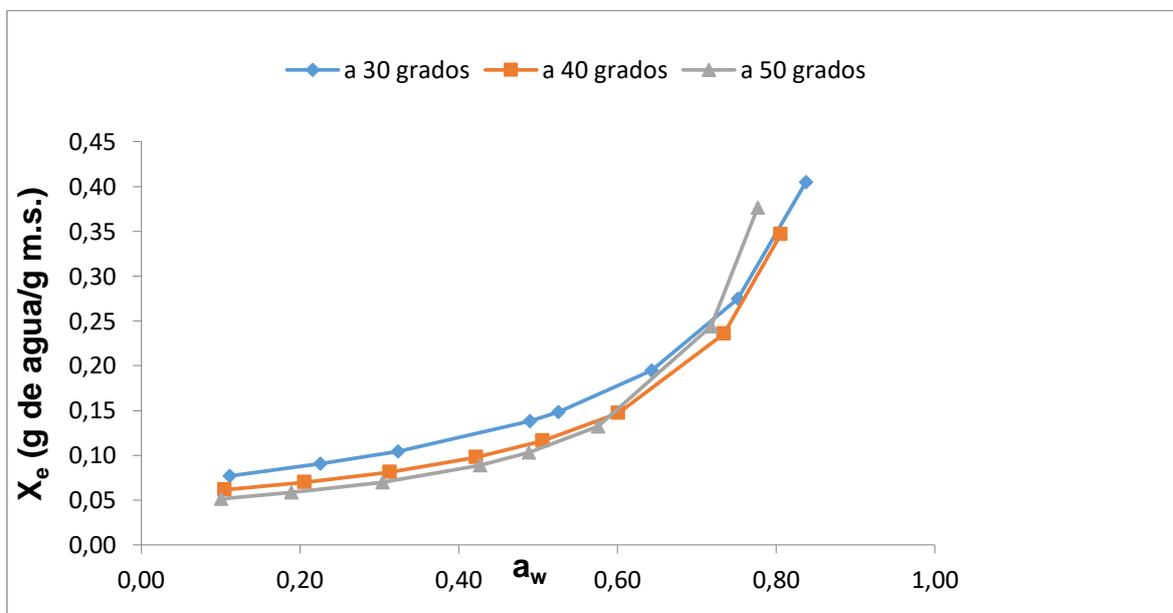


Figura 09: **Isotermas de adsorción precisas mediante el modelo de GAB a las tres temperaturas de estudio.**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

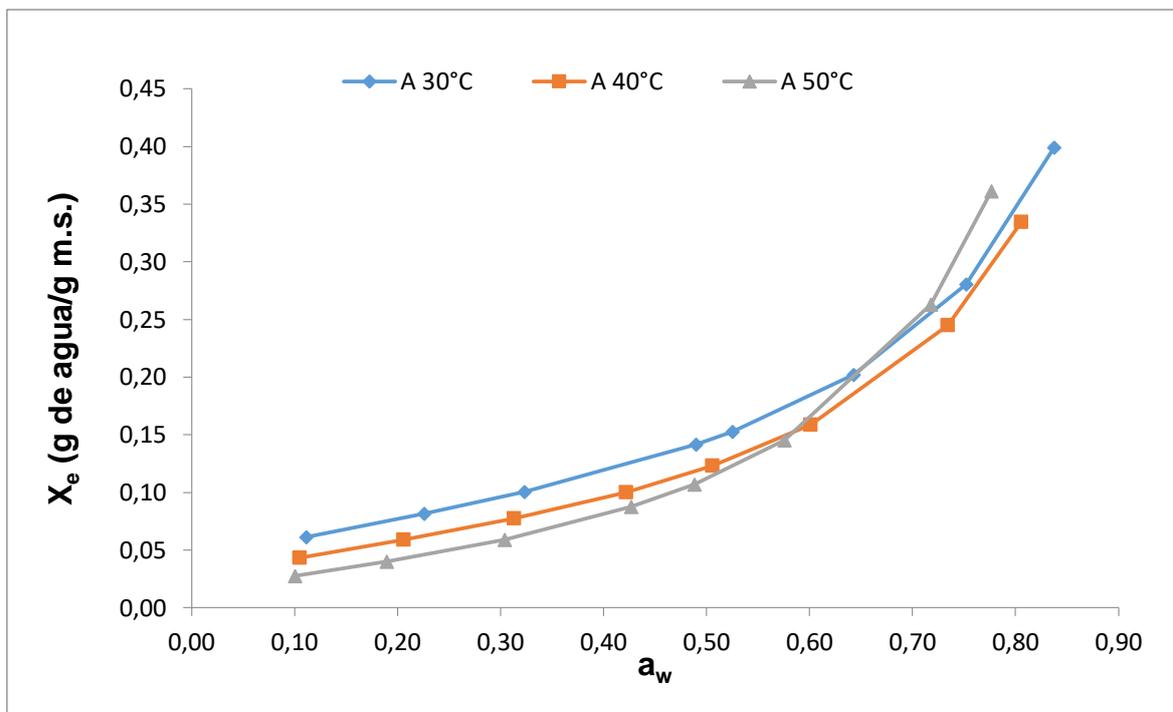


Figura 10: **Isotermas de adsorción precisa mediante el modelo de HALSEY a las tres temperaturas de estudio**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

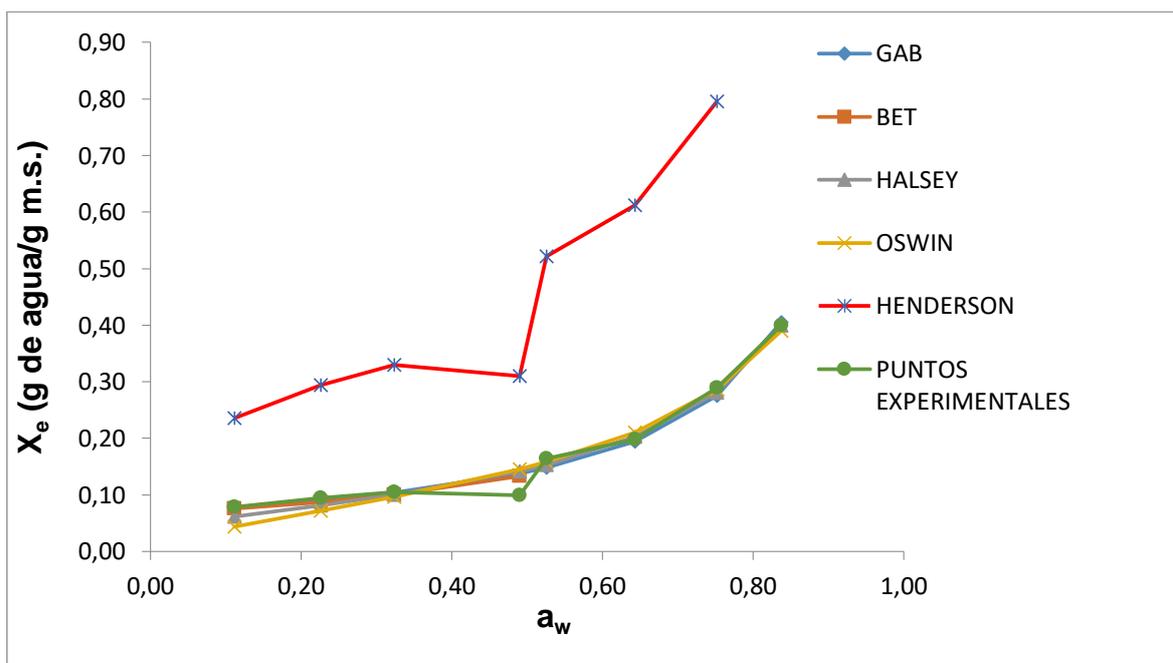


Figura 11: **Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos indicados para la harina de castaña a la temperatura de 30°C**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

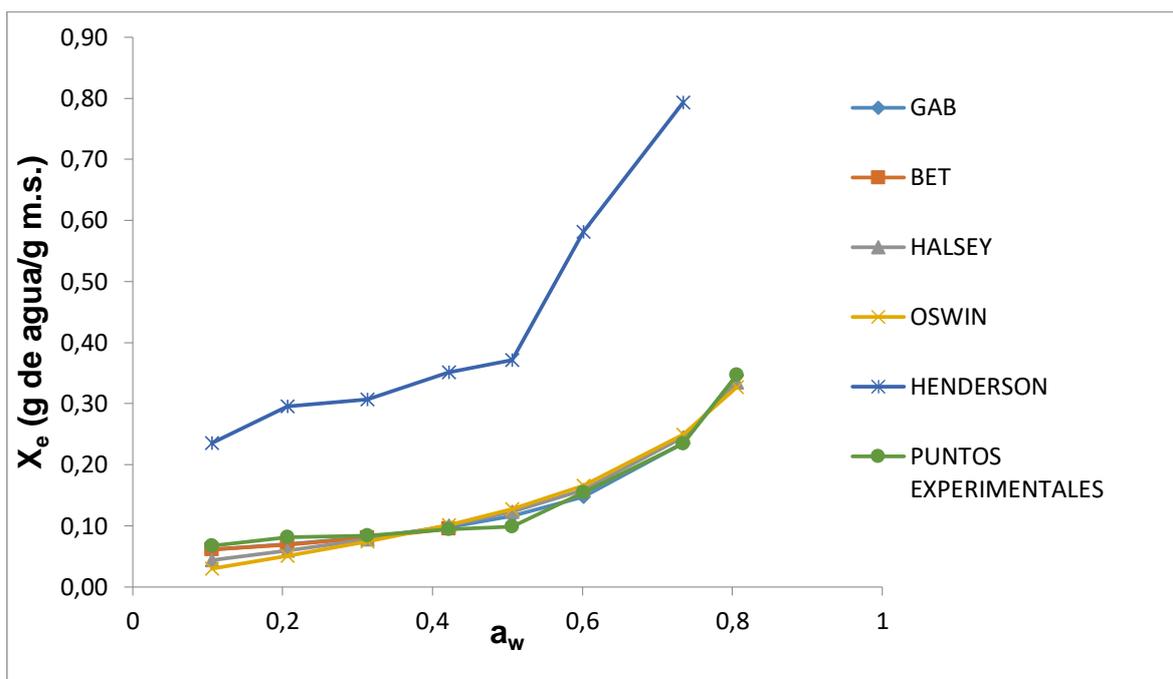


Figura 12: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos indicados para la harina de castaña a la temperatura de 40°C

Fuente: Elaboración propia (2015).

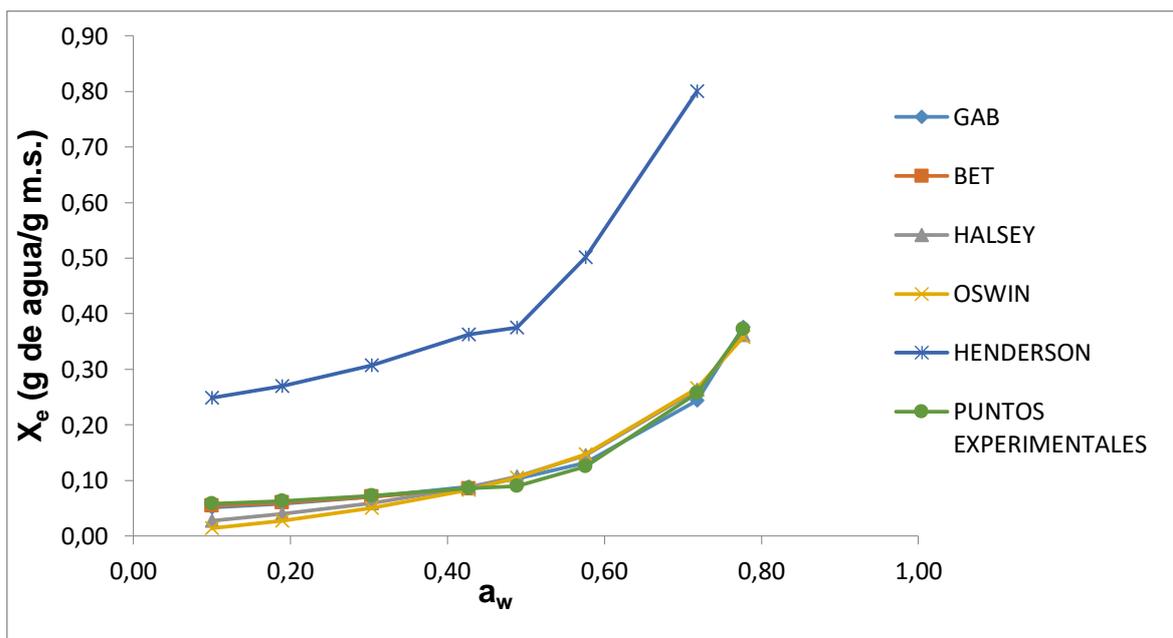


Figura 13: Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos indicados para la harina de castaña a la temperatura de 50°C

Fuente: Elaboración propia (2015).

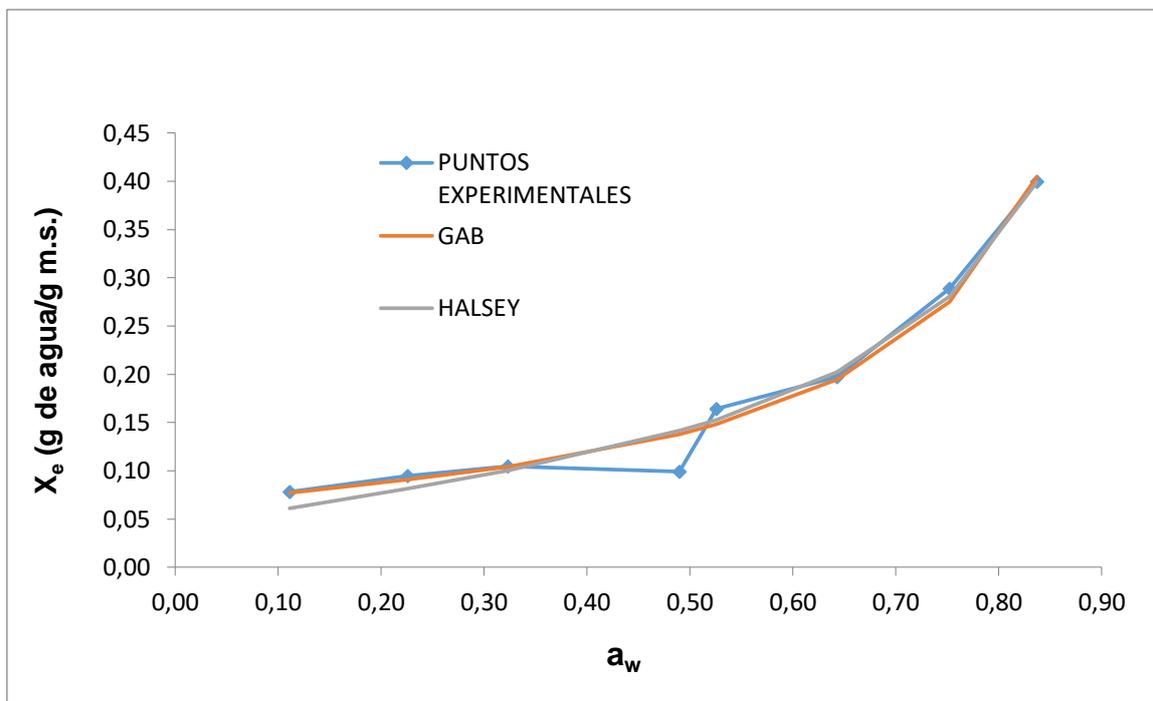


Figura 14: **Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos GAB y HALSEY para la harina de castaña a la temperatura de 30°C**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

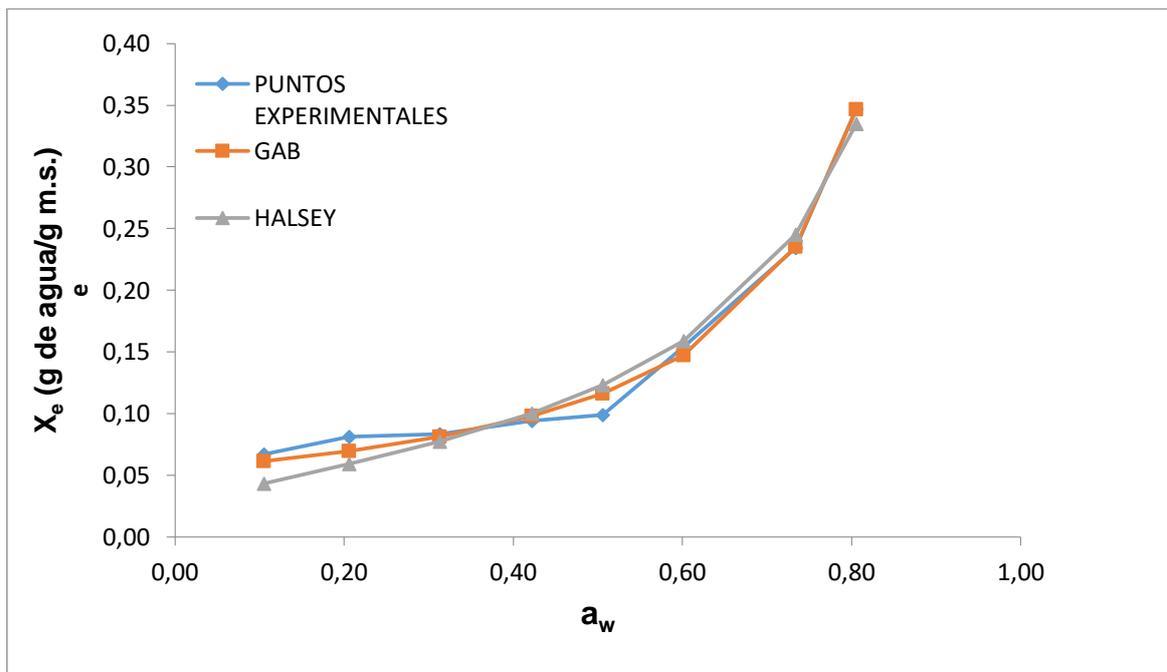


Figura 15: **Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos GAB y HALSEY para la harina de castaña a la temperatura de 40°C**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

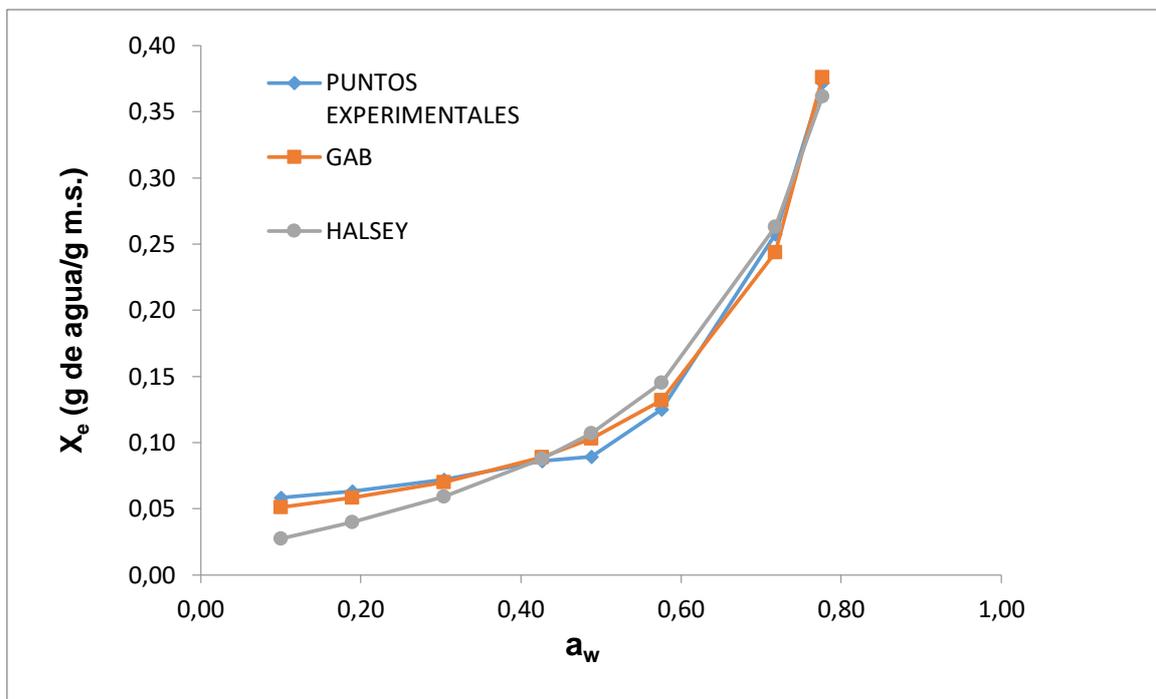


Figura 16: **Isotermas de adsorción ajustadas mediante los modelos GAB y HALSEY para la harina de castaña a la temperatura de 50°C**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

3.5. CALOR ISOSTERICO DE ADSORCION

Para establecer el calor isostérico de adhesión (q_{st}) de la harina de castaña, se consideraron los valores de X_e predeterminados a las diferentes temperaturas de evaluación mediante el patrón de Halsey, ya que exhibió el excelente arreglo de los datos experimentales, así mismo los valores de a_w fueron calculados a partir de este modelo.

En la tabla 13 muestra los valores del calor isostérico de adsorción experimental y calculado mediante las ecuaciones 9 y 11 respectivamente.

Tabla 13. **Calor isostérico de adsorción (q_{st}) de la harina de castaña a diferentes valores de humedad de equilibrio.**

X_e (b.s.)	$q_{st}(\text{exp.})^a$ (kJ/mol)	$q_{st}(\text{cal.})^b$ (kJ/mol)
0,0679	-2,8059	-8,0550
0,0797	-3,9728	-8,1172
0,0869	-4,3509	-8,1556
0,0931	-4,5539	-8,1889
0,1175	-4,7596	-8,3207
0,1571	-4,3762	-8,5500

a: Calor isotérmico de adhesión experimental obtenido por la ecuación 10

b: Calor isotérmico de adhesión calculado, obtenido por la ecuación 12

Fuente: **Elaboración propia (2015)**

La figura siguiente presenta datos de diligencia de agua (a_w) en cargo de la temperatura para cada humedad de equilibrio (X_e) en la forma de isósteras. Notándose en este cuadro la influencia de la temperatura en las curvas, es decir para bajos contenidos de humedad la a_w aumento con el incremento de la temperatura. Similares tendencias para las isósteras fueron obtenidos por **Tsami et al. (1990)** para uva pasa y ciruelas secas. **Kohayakawa (2004)** para pulpa seca de mango (*Mangifera indica*), **Alakali et al (2009)** para jengibre (*Zinziber officinale*) seco y **Ccalli (2003)** para higo (*ficus carisa L.*) seco.

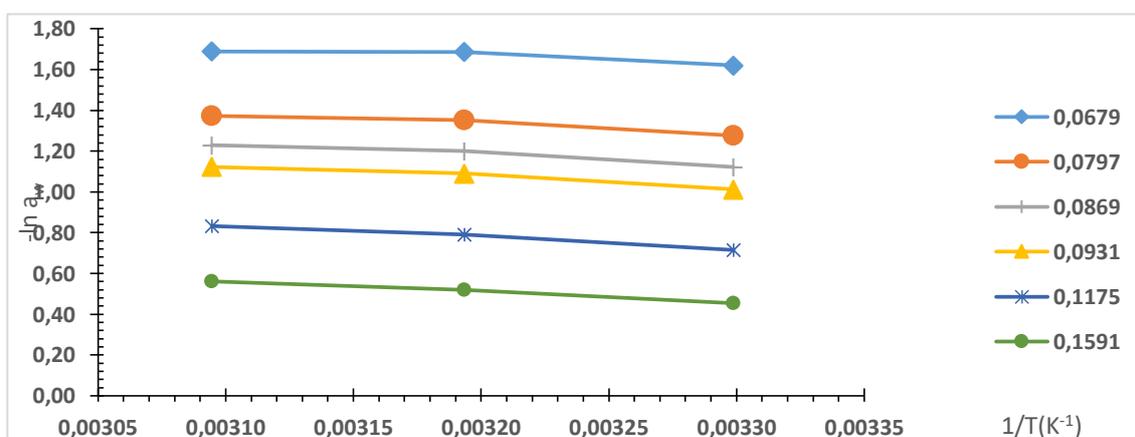


Figura 17: **Curvas de $-\ln(a_w)$ versus $1/T$ a diferentes humedades de equilibrio para la harina de castaña.**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

En la figura 18 son presentados los productos del entusiasmo isostérico de adhesión (q_{st}) en empleo del comprendido de agua de medida (X_e), apreciados mediante la ecuación 11. En la figura se observa lo siguiente q_{st} decrece desde -2,8059 a -4,3762Kj/mol, con el aumento de 0.06 a 0.15 X_e g agua/ g m.s. aproximadamente.

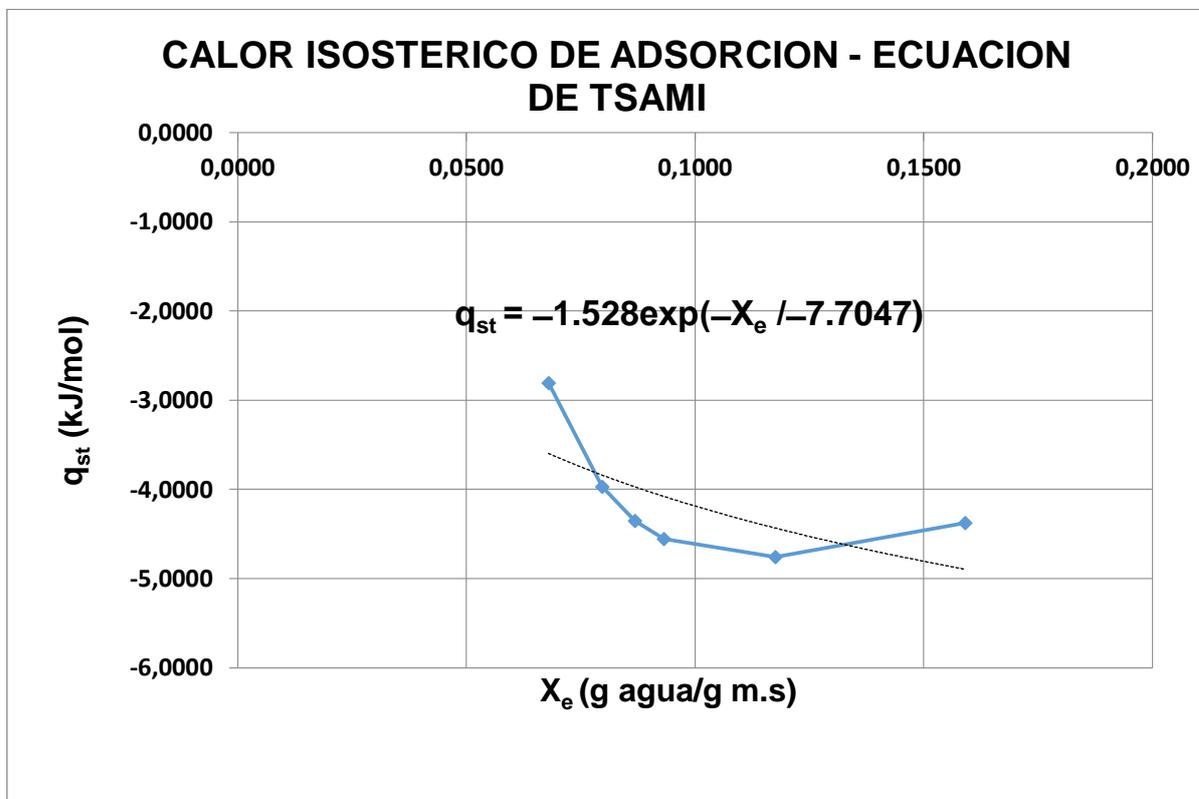


Figura 18: **Atribución de la humedad de equilibrio (X_e) en el calor de adhesión (q_{st}) para la harina de castaña.**

Fuente: **Elaboración propia (2015).**

Tsami et al. (1990). Evaluaron los calores isostéricos de adsorción en varias frutas secas (uva, higo, ciruelo y albaricorque) y estos decrecen de 20 kJ/mol hasta valores cercanos a cero cuando el contenido de humedad se incrementó de 0.05 a 0.5 g agua/g m.s.

Alakali et al. (2009), al estudiarlas isotermas de adsorción en el jengibre (Zinziber ofcinali) seco observo que los q_{st} decrecieron de 10.113 a 0.851 kJ/mol con un incremento de la humedad de 0.10 a 0.22g agua/g m.s.

Este comportamiento es aplicado tomando en cuenta que primeramente la sorción sucede en los sitios disponibles más activos, proporcionando el principio a una entrada carácter de interacción. A medida que la mayoría de estos sitios llegan a ser ocupados, la sorción ocurre en menores sitios disponibles, dando origen a bajos calores de sorción (**Gabas, 1998**). **Tsami et al, (1990)** indica que los entusiasmos de sorción de agua (q_{st}) a despreciables comprendidos de humedad son una predicción de la fuerte interacción entre los dispositivos agua-alimento en las frutas secas.

También se aprecia en la figura 18, que a elevados contenidos de humedad los valores de q_{st} para la adsorción llegan a tener valores negativos. De concierto con **Tsami (1991)**, los productos más dañinos del q_{st} muestran un mayor valor del agua atada en la extensión del alimento.

Tabla 14: **Parámetros Q_o y X_o y coeficiente de determinación (R^2)ajustado de la ecuación de Tsami et al. (1990)**

Muestra	Parámetros ^a		R^2
	q_o	X_o	
Harina de castaña	-1,528	-7,7047	0,43

a:Parámetros a un nivel de significancia del 5%

Fuente: **Elaboración propia (2015)**

La figura 18, se presentan los productos del entusiasmo isostérico de adsorción en empleo del incluido de relente de medida X_e (valores específicos), apreciados de contrato a la igualdad de Tsami, de esta figura se concluye que a medida que aumenta la relente de medida de 0,06 a 0,15g de agua/g m.s., el costo de q_{st} acorta de -2,8059 a -4,3762KJ/g de harina de castaña (ver tabla 13), este acontecimiento es habitual en alimentos (Labuza, 1984 y Heldman y Lund, 2007). La ecuación de Tsami, muestra un factor de $R^2= 43\%$.

3.6. ENERGIA DE ACTIVACIÓN.

Labuza (1984), los 3 parámetros (X_m , C_{GAB} y K_{GAB}) determinan las interacciones del agua con los macroconstituyentes del alimento y tiene una interpretación termodinámica.

La dependencia con la temperatura de las medidas termodinámicas del modelo de GAB (X_m , C_{GAB} y K_{GAB}) se valoraron con la igualdad de Arrhenius (ecuación 12). El valor de los parámetros de GAB para cada temperatura es mostrada en la tabla 15.

Tabla 15. **Parámetros del modelo de GAB a las diferentes temperaturas de evaluación.**

MODELO	PARAMETROS	TEMPERATURAS		
		30°C	40°C	50°C
GAB	X_m	0.0720	0.05500	0.04630
	C_{GAB}	170.39040	5821.92700	392.14970
	K_{GAB}	0.98200	1.04500	1.12900

Fuente: **Elaboración propia (2015)**

Los valores de energía de activación, E_a (KJ/mol), se determinaron graficando el $\ln(D)$. (D : es un parámetro de la isoterma de GAB) versus $1/T$ (K^{-1}) (ANEXO 07), aplicando la ecuación 12, obteniendo así la E_a . Los valores de E_a son mostrados en la tabla 16.

Tabla 16: **Energía de activación de los parámetros termodinámicos del modelo de GAB.**

MODELO	PARAMETROS	$E_a(\text{KJ/mol})^a$	R^2
GAB	X_m	12,0163	0,96
	C_{GAB}	36,63257354	0,01
	K_{GAB}	-5,6722	0,98

a: **La energía de activación (E_a) siempre es positiva** (Pons, 1981)

Fuente: **Elaboración propia (2015)**

La energía que se disipa para que se adsorba agua hacia la superficie de la harina de castaña, para la formación de la monocapa (X_m), es decir, para acoplarse sobre los grupos polares específicos de la harina de castaña es 12,0163 kJ/mol, para un intervalo de temperatura de 30°C a 50°C. **Vega et al. (2006)**, determino una E_a igual a 15.09kJ/mol a nivel de la monocapa para la harina de maíz, en un rango de temperatura de 7°C a 45°C. Esta diferencia se puede deber a que la harina de maíz presenta mayores grupos dinámicos capaces de adsorber agua, debido probablemente a la mayor presencia de carbohidratos (mayor presencia de grupos OH- por parte de los polímeros de almidón), así como NH^{+2} y COO^- de las proteínas, para la unión con el agua (**Espino,1995; Vega et al.,2006**). Entonces se puede decir que la harina de castaña presenta sobre su superficie menores grupos activos capaces de adsorber humedad y centros activos unidos a moléculas de agua, además de grasas y proteínas, en comparación a otras harinas como el maíz. En la tabla 16, se observa que el parámetro C_{GAB} , tiene relación con la discrepancia de carácter de los átomos adsorbidas de la inicial monocapa y las otras innecesarias, ya que relaciona con la entalpia (**Prieto et al., 2006**), esta energía se aprecia en forma de energía de activación que para la harina de castaña presenta un valor de 36,6325 que es mayor a la unidad lo cual es indicativo que es un producto adsorbente de humedad.

Por otra parte, el parámetro K_{GAB} hace referencia al potencial químico (Zug, 2002a), es decir la energía necesaria para formar la unión entre los átomos de agua y las áreas activos (**Harvey, 2002**), presentó una E_a de -5,6722 notándose poca

influencia de la temperatura en este parámetro, incrementando su valor cuando aumenta la temperatura.

$$K = -11,088 + 1684,6$$

De la misma manera el valor de la monocapa X_m muestra poca a regular dependencia negativa con la temperatura disminuyendo con la ampliación del clima, al realizar un análisis de los valores de X_m a través de una regresión lineal, presenta una ecuación con $R^2 = 0,96$

$X_m = 0,0073 + 0,7580$. **Caceres, (2002)**, encontró una relación lineal negativa hacia la monocapa X_m del tipo de GAB, para el secado de uva.

CONCLUSIONES

- Las isotermas de adsorción de la harina de castaña exhibieron un comportamiento del tipo III para todas las temperaturas de estudio, similar a otros productos alimenticios.
- De acuerdo a los parámetros estadísticos, los modelos que sobresalen ajustaron los datos experimentales de las isotermas de adsorción de la harina de castaña fueron los modelos de GAB, Halsey y Oswin, sin embargo las isotermas de GAB y Halsey ajustaron con valores de R^2 mayores a 95%, desvió porcentual medio (P) menores del 10% y errores estimados de humedad (SEM) inferiores a 0,0204.
- Las situaciones de acumulación, para aseverar la mayor permanencia de la harina de castaña está en un intervalo de humedad de 13 a 17% en base seca y menores a 60% HRE para temperaturas entre 30°C a 50°C.
- El importe de relente de la monocapa (X_m) del modelo de GAB presenta dependencia negativa con la temperatura, disminuyendo de 0.0720 a 0.04630g agua/g b.s. para el rango de temperatura de 30°C a 50°C. Así mismo, el parámetro K_{GAB} , muestra dependencia lineal positiva con el incremento de la temperatura aumentando de 0.98200 a 1.12900 en el mismo intervalo de temperatura. Por otra parte el valor de C_{GAB} es mayor a la unidad y menor con relación a otros productos como maíz, indicando que la harina de castaña presenta baja o regular capacidad de adsorción, se puede almacenar a humedades relativas menores a 60%.
- El calor isostérico de adhesión (q_{st}) reduce con el aumento del comprendido de agua de la harina de castaña, disminuyendo de -8,0550 a -8,5500kJ/mol para humedades de 0,06 g agua/g m.s. a 0,15g agua/g m.s.
- La autoridad del clima con las medidas del modelo de GAB, se evaluaron a través de la energía de aceleración manejando la igualdad de Arrhenius. Siendo $E_a = 12,0163$ para el parámetro X_m , 36,6326kJ/mol para la constante termodinámica C_{GAB} , -5,6722kJ/mol para k que es la constante que define el potencial químico.

RECOMENDACIONES

- Estudiar la posibilidad de aprovechar integralmente la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) por la importancia para la industria alimentaria, arte, cultura y cosmética.
- Llevar a cabo un artículo para establecer la vida útil de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) durante su almacenamiento a las condiciones sugeridas en este trabajo.
- Realizar un estudio en la valoración de las isotermas de sorción de la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) a las temperaturas de 20°C, 25°C y 35°C, con la finalidad de encontrar los parámetros adecuados para el secado de este producto (humedad final del producto y la energía requerida para su secado)
- Realizar un estudio de la cinética de secado para la harina de castaña (*Bertholletia excelsa H.B.K.*) a la temperatura 20°C, 25°C y 35°C, teniendo en cuenta las isotermas de adsorción 12,0163 para el parámetro X_m , 36,6325kJ/mol para la constante termodinámica C_{GAB} , y - 5,6722kJ/mol para k que es la constante que define el potencial químico.

BIBLIOGRAFIA

Ayala, A. (2011) **“Estimación de las Isotermas de adsorción y el calor Isoterico en Harina de Yuca”** Ingeniero Agrícola. Ph.D en ingeniería de Alimentos. Escuela de Ingeniería de Alimentos. Universidad del Valle. Cali-Colombia.

Arana a., Vanesa s. (2002). **Mejoramiento del sistema de cosecha de castaña (*Bertholletia excelsa*) en Madre de Dios y sus impactos en la economía del productor castañoero.** ACA – Proyecto Conservando Castaños. Puerto Maldonado.

Antunes, A. J.; Markakis, P. (1997). **“Protein supplementation of navy beans with Brazil nuts”**, *J.Agric. Food Chem.* Vol.25 (5):1096-1098.

Arana, A., Sequeira, V. y Torres, J. 2001. **“Mejoramiento de los sistemas de cosecha de castaña en Madre de Dios”**, Reporte sin publicar de la Asociación para la Conservación de la Cuenca Amazónica (ACCA). Puerto Maldonado, 77pp.

Adamson, A. W. (1997). **“Physical chemistry of surfaces”**. Wiley-Interscience. New York.

Araujo, C. M. (2001). **“Suco de camu-camu (*Myrciaria dubia* H.B.K Mc Vaugh) microencapsulado obtido atraves de secagem por atomização”**. Tese de Doutorado em Engenharia de alimentos, facultade de Engenharia de alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Alakali, J., Irtwange, S. V. and Satimehin, A. (2009) **“Moisture adsorption characteristics of ginger slices. Ciencia y tecnología de alimentos”**, Campinas, 29(1): 155-164. Campinas, sao Paulo- Brasil.

Arias, P., Dankers, C., Liu, P., Pilkauskas, P. (2004). **“La Economía Mundial del Banano” 1985 - 2002.** Dirección de Productos Básicos y Comercio. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma - Italia.

Barbosa, Canovas, G. y Vega-Mercado, H. (2000). **“Deshidratacion de alimentos”**. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza – España.

Bernárdez, M. (2000). **“Composición nutricional y evolución pos-cosecha de variedades de castañas”**. Tesis Doctoral. Universidad de Vigo.

Brennan, J. G., Butters, J. R., Cowell N.D. y Lilly, A.E. V. (1980). **“Las operaciones de la ingeniería de los alimentos”**. Segunda edición. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza – España.

Collada, C., Casado, R., Barber, D., Fernandez Caleya, R., & Aragoncillo, C(1984). **“Extraccion y fraccionamiento de proteinas de castana. Congreso Internacional sobre el castaño”**.(Lourizan, Pontevedra) pp. 183-185.

CAMPOS L. (2006). **“Diagnóstico del Programa Regional de Biocomercio en la Amazonía”**. PROMPEX. Lima.

Comaposada, J.; Gou, P.; Arnau, J. (2000). **“The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms”**. Meat Science, v. 55, n. 3, p. 291-295.

CAMPOS L. 2006. **“Diagnóstico del Programa Regional de Biocomercio en la Amazonía. PROMPEX”**. Lima. 33 pp.

Candela-Perú. (2006) **“La cadena de valor de la castaña del Perú”** candela-Perú 1^{er} Edición.

Ceballos, P. (2009). **“Evaluación de varios modelos de isothermas de isothermas de adsorción de agua de un polvo de fruta deshidratada”**

Choque, D. (2009). **“Evaluación de las isothermas de adsorción del Maíz Morado (*zea mays L*) variedad cateño”**. Tesis de Maestría para optar el grado de Maestro en ciencia y tecnología de alimentos, Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco- Perú.

Cheftel, J. y Cheftel, H.(1976). **“Introducción a la bioquímica y tecnología de alimentos, Volumen I”**. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza - España.

Chang, J.C.; Gutenmann W.H.; Reid, C.M.; Lisk, D.J. 1999. **“Selenium content of Brazil nuts from two geographic locations in Brazil”**, *Chemosphere*. Vol.30, (4):801-802.

Duarte, A. L. (2008). **“Veriacao das propriedades físico-mecanicas e da qualidade da mamona (*ricinus communis* L). durante a secagem e o armazenamento”**. Tese de Doutorado em Engenharia Agricola. Universidade Federal de Vicosa. Vicosa, Minas Gerais – Brasil.

Díaz, J. (2002). **Deshidratación por aire caliente de músculo de camarón gigante de malasia (*Macrobrachium rosenbergii*)** Tesis de Ingeniero Agroindustrial. Facultad de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto - Perú.

Eluan, A., Meller, L.H. y Silva, R. (2008). **“Comportamiento higroscópico do acai (*Euterpe oleracea* Mart.) e cupuacu (*Teobroma grandiflorum* Schum.) em po”** Ciencia y Tecnología de Alimentos, Campinas, 28(4): 895-901. Campinas, Sao Paulo-Brasil.

ESPINOZA, E.(2005). **“El Impacto de la cosecha de castaña (*Bertholletia excelsa*) sobre la fauna silvestre en los castañales del departamento de Madre de Dios, Peru”**. Tesis para optar el título de ingeniero forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, 72pp.

Escobal, J., Agreda V., Aladana U. (2000). "**Derechos de propiedad, regulación de concesiones y uso óptimo de los recursos naturales**": criterios para regular a los extractores de castaña en la provincia de tambopata, en la selva del Perú. Lima, 33 pp. Descarga web: <http://www.grade.org.pe>

Fadini, A. L., Pereira, P. M., Pereira, D. C., Zaratini, F., Bonifacio, M. e Batista, G. (2006). "**Isotermas de sorcao de umidades e estudo de estabilidade de Macadamias Drageadas**". Brazilian Journal of Food Technology, 9(2): 83-88

Ferreira, C. D. y Pena, R. S. (2003). "**Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (Bactris gasipaes)**". Ciencia y Tecnologia de Alimentos, Campinas, 23(2): 251-255. Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Figueiredo, F. J.C. y J.E. U. de Carvalho. (1994). "**Avaliagáo de características recalitrantes de sementes de castanha-do-brasil**". Belém: EMBRAPA-CPATU, 17p. (EMBRAPA-CPATU. Boletim de Pesquisa, 154).

Fennema, O., R. (1993). "**Análisis de Alimentos. Fundamentos y Técnicas**". Editorial Reverté – España

Gabas, A., L. (1998). "**Secagem de Uva Itália em Leito Fixo**". Tesis de Maestría en Ingeniería de Alimentos. Facultad de Ingeniería de alimentos de la Universidad Estadual de Campinas Sao Paulo - Brasil.

Gabas, A. L.; Menegalli, F. C.; Telis-Romero, J. (2000) "**Water sorption enthalpy-entropy compensation based on isotherms of plum skin and pulp**" Journal of Food Science, v. 65, p. 680-684.

Gabas, A. L., Nicoletti, V R., Amaral, P. J. y Telis-Romero J. (2007). "**Effect of maltodextrin and arabic gum in wáter vapor sorption thermodynamic propierties of vacuum dried pineapple pulp poder**". Journal of Food Engineering, 82: 246-252.

Gabas, A. L., Telis-Romero J., Giraldo-Gomez, G.I y Nicoletti, V. R. (2009). "**Propiedades termodinámicas de sorcion de agua de la pulpa de lulo (Solanum quitoense Lam) en polvo con encapsulante**". Ciencia y tecnología de alimentos, campinas. 29(4): 911-918. Campinas, Sao Paulo - Brasil

Garica, S.V.; Schmalku, M.C.; Tanzariello, A.; (2007). "**Isoterma De adsorcion y cinetica de sacado de ciertas hortalizas y aromaticos cultivados en Misiones**". RIA. Vol. 36(1): 115-129.

Hubinger, M., D.; Pezantes, D., V.; Kurozawa, L., E.; Sobral, P., J., A. (2009). "**Isotermas de dessorção de filé de bonito (Sarda sarda) desidratado osmoticamente e defumado**". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.3, p.305–311. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG - Brasil.

Iglesias, H., Chirife, J. (1982). **“Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components”**. New York: Academic Press.

Ikhu-Omoregbe, D.I.O (2006) **“Comparison of the sorption isotherm characteristics of two cassava products”** Int. J. Food Proper., 9: 167-177.

Kurozawa, L. E., El-Aouar, A. A. e Murr, F.E.X. (2005). **“Obtencaode isotermas de dessorcao de cogumelo in natura e desidratado osmoticamente”**. Ciencia y Tecnologia de Alimentos, Campinas, 25(4): 828-834. Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Lima, E.E. (2006). **“Producao e armazenamento da farinha de facheiro (Cereus Squamosus)”**. Tese de Mestrado em Engenharia Agricola, Area de concentracao em armazenamento e processamento de productos agrícolas, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Campina Grande, Paraiba – Brasil.

Lopes-Filho, et al. (2002) **“Sorpton Isotherms of Alligator’s Meat (Caiman crocodrilus yacare)”**. Journal of Food Engineering, v. 19, p. 119-126.

Labuza, T. P. (1980). **“The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration”**.Food Technology 34, 36-42

Madrigal-A., Guzmán, A., Bautista, J., García D.C.L., Vázquez G., Rodríguez-P., Moreno, R.V.H. (2006).**“Producción y Caracterización Físico-química de Harinas de Castaña FHIA-20, para su incorporación en panificación”**. Revista, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Colima, Facultad de Ciencias Biológicas UANL, Instituto de Ciencias Agrícolas U de Guanajuato – México.

Mclaughlin, C. P.; Magee, T. R. A. (1998).**“The Determination of Sorption Isotherm and the Isosteric Heats of Sorption for Potatoes”**.*Journal of Food Engineering*. Vol. 35 (3): 267-280.

Matos Ch., R., A. (1992). **“Evaluación de modelos matemáticos de isotermas de sorción en Oca (Oxalis tuberosa mol), Olluco (Ullucus tuberosus loz) y algunos derivados”**. Tesis de maestría - UNALM, Lima - Perú.

MILLER, D.D. (2007).**“Chestnut mycorrhizae and implications for tree production. En: M.S.Burnett and R.D. Wallace (Eds.). Chestnuts and creating a commercial chestnut industry.Proc”**.2nd Pacific Northwest Chestnut Congress.(Corvallis, Oregon), pp. 52-54.

Molina- Filho, L., Marques, M.A. Telis-Romero, J y Romeiro, S. H. (2006). **“Influencia da temperatura e da concentracao do cloreto de Sodio (NaCl) nas isotermas de sorcao da carne de tambiqui (Colossoma Macroparum)”**. Ciencia y Tecnología de Alimentos, Campinas, 26(2):453-458. Campinas,Sao Paulo – Brasil.

Marques, M.A. (2009). **“Influencia de encapsulantes e do metodo de secagem nas propiedades fisico-quimicas e atributos de qualidade de polpo de maracuja (passiflora edulis f. flavicarpa) em po”**. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciencia de alimentos, Area de Concentracao: Engenharia de Alimentos, Universidad Estadual Paulista Julio Mesquita Filho. Sao Jose do Rio Preto, Sao Paulo – Brasil.

Mathlouthi, M, Rogé, B. (2003). **“Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders”**. Food Chemistry. 82: 61 – 71

Matos-Chamorro, M.; Raho-angulo, R. (2010). **“Influencia del tamaño de partícula en la isoterma de adsorción del harina de haba”** (Vicia faba L), *Rev. Investig. Ciencia. Technol. Aliment.* Vol. 1(1): 51-57.

Marques, M. A., Telis-Romero, J. y Nicoletti, V. R. (2010). **“Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp (Passiflora eduli) powder”**. Ciencia y Tecnologia de Alimentos, Campinas, 30(4): 993-1000. Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Malpighia puniceifoli L.(2002) **“Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas”**.Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Mysels, K. J. (1967) **“Introduction to colloid chemistry”**. Interscience Publishers Inc. New York.

Oviedo, Z., O. (1969). **“La determinación de la cobertura monomolecular, como un método para evaluar la calidad de proteína y bondad del procesamiento en pasta de semilla de algodón”**. Tesis - UNALM, LIMA - PERÚ.

Prieto, A. Gordillo. (2006) **“Evaluación de las isotermas de sorción en cereales para desayuno”** Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Centro de Investigaciones Químicas Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Ciudad Universitaria, C.P. 47076, Pachuca, Hidalgo, México.

Pedroso, C.M. (1997). **“Cinética de secagem do milho superdoce (Zea mays L.)”**Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Sao Paulo-Brasil.

Pulla, H. P. (2011). **“Determinación de las isotermas de adsorción del ají (Capsicum annuum L.) seco”**. Tesis de Ingeniero Agroindustrial. Facultad de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Madre de Dios - Perú.

Resende, O., Correa, P. C. Duarte, A. L. e Menezes, D. (2006). **“Isotermas e calor isostérico de sorcao do feijão”**. Ciencia y tecnología de alimentos, Campinas, 26(3): 626-631. Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Sandoval,A; Barreiro, J.; Tovar,X. yAngueira,M. (2002). **“Características de sorción del cacao fermentado en polvo (*Theobroma cacao*)”**. Rev.Téc. Ing. Universidad del Zulia. 5(1): 1-7.

Torrealba, M., A. (2007). **Determinación de Isotermas de Sorción de Humedad en Harina Precocida de Plátano Verde (*Musa paradisiaca L.*)**. Revista AGROLLANIA (Vol. 4) 2007: 9 - 22.

Telis-Romero, J., Kohayakawa, M.N., Silveria, V. Pedro, M. A. M. e Gabas, A. L. (2005). **“Enthalpy-Entropy compensation based on isotherms of mango”**. Ciencia y Tecnología de alimentos, Campinas, 25(2): 297-303. Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Vega, A. Lara, E. y Lemus, R (2006) **“Isotermas de adsorción en harina de maiz (*Zea mays L.*) Ciencia y Tecnología de Alimentos”**, Campinas, 26(4): 821-827 Campinas, Sao Paulo – Brasil.

Viccina, G. (2006). **“Determinación de las Isotermas de Sorción del Romero (*Rosmarinus officinalis L.*) y la Salvia (*Salvia officinalis L.*)”**. Tesis de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Villachica, H. (1996). **“Frutales y hortalizas Promisorias de la amazonia”**. Tratado de Cooperación Amazonica, TCA. Lima-Peru.

Zug, J. (2002a). **“Isotermas de Adsorción: Bases Mecánico – Estadísticas”**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires - Argentina.

Zug, J (2002b). **“Fisicoquímica Especial. Isotherma de sorción de tres etapas y modelos de sorción restringida”**. Facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires – Argentina.

Zug, J. (2002). **“Fisicoquímica Especial. Isotherma de sorcion de tres etapas y modelos sorcion restringida”** Facultad de Ingenieria, Universidad de Buenos Aires – Argentina.

Zuidema P A., Wim Dijkman & Jeannette Van Rijsoort. (1999) **“Crecimiento de Plantines de *Bertholletia excelsa H.B.K.* en Función de su Tamaño y la Disponibilidad de Luz”**, en Revista Ecología en Bolivia. Número 33: 23-35.

Zuidema, P. y R.G.A Boot. 2002. **“Demography of the Brazil Nut Tree (*Bertholletia excelsa*) in the Bolivia Amazon”**. Journal of Tropical Ecology.

Zuidema, P. y R.G.A Boot. 2002. **“Demography of the Brazil Nut Tree (*Bertholletia excelsa*) in the Bolivia Amazon”**.Journal of Tropical Ecology.

Zhang, X.; Liu, X.; Gu, D.; Zhou, W.; Wang, R. & Liu, P. (1996). **“Desorption Isotherms of Some Vegetables”**. Journl of the Science and Food Agriculture, 70: 303-306.

ANEXOS

ANEXO: 01**TABLA 17: CONTENIDO DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO PROMEDIO PARA LA HARINA DE CASTAÑA EN BASE SECA A SUS RESPECTIVAS ACTIVIDADES DE AGUA Y TEMPERATURA.**

SOLUCION SALINA SATURADA	30°C		40°C		50°C	
	a_w	$X_e(\text{b.s})^a$	a_w	$X_e(\text{b.s})^a$	a_w	$X_e(\text{b.s})^a$
(LiCl)	0.1111	0.0784	0.1053	0.0672	0.1003	0.0582
($\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$)	0.2257	0.0948	0.2061	0.0811	0.1893	0.0632
(MgCl_2)	0.3232	0.1049	0.3131	0.0836	0.3038	0.0722
(K_2CO_3)	0.4897	0.0993	0.4220	0.0941	0.4268	0.0860
(MgNO_3)	0.5254	0.1645	0.5060	0.0988	0.4884	0.0893
(NaNO_2)	0.6428	0.1976	0.6012	0.1543	0.5758	0.1253
(NaCl)	0.7521	0.2891	0.7342	0.2346	0.7178	0.2574
(KCl)	0.8374	0.3998	0.8056	0.3470	0.7768	0.3722

ANEXO: 02**TABLA 18: CARACTERÍSTICAS DE LAS SALES UTILIZADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCION PARA LA HARINA DE CASTAÑA.**

SAL	Formula	Peso Molecular (g/mol)	Grado	Presentación	Porcentaje de Pureza	Marca	Especificación
Cloruro de Litio	(LiCl)	42,39	AR	Perlas	99,1	Fermont	ACS***
Acetato de Potasio	(KC ₂ H ₃ O ₂)	98,15	AR	Polvo	99	Scharlau	ACS
Cloruro deMagnesio	(MgCl ₂)	99,9	AR	Perlas	99,9	Fermont	ACS
Cloruro de Potasio	(K ₂ CO ₃)	138,21	AR	Polvo	99	Scharlau	ACS
Nitrato de Magnesio	(MgNO ₃)	256,41	AR	Cristales	99,8	Fermont	ACS
Nitrato de sodio	(NaNO ₂)	84,99	AR	Cristales	100	Mallinckrod	ACS
Cloruro de Sodio	(NaCl)	58,44	AR	Cristales	100	Mallinckrod	ACS
Cloruro de Potasio	(KCl)	74,55	AR	Cristales	100	Mallinckrod	ACS

* Grado reactivo

ANEXO 03: EVALUACION DE LOS RESIDUALES EN LAS ISOTERMAS DE ADSORCION PARA LA HARINA DE CASTAÑA (*Bertholletia excelsa* H.B.K.)

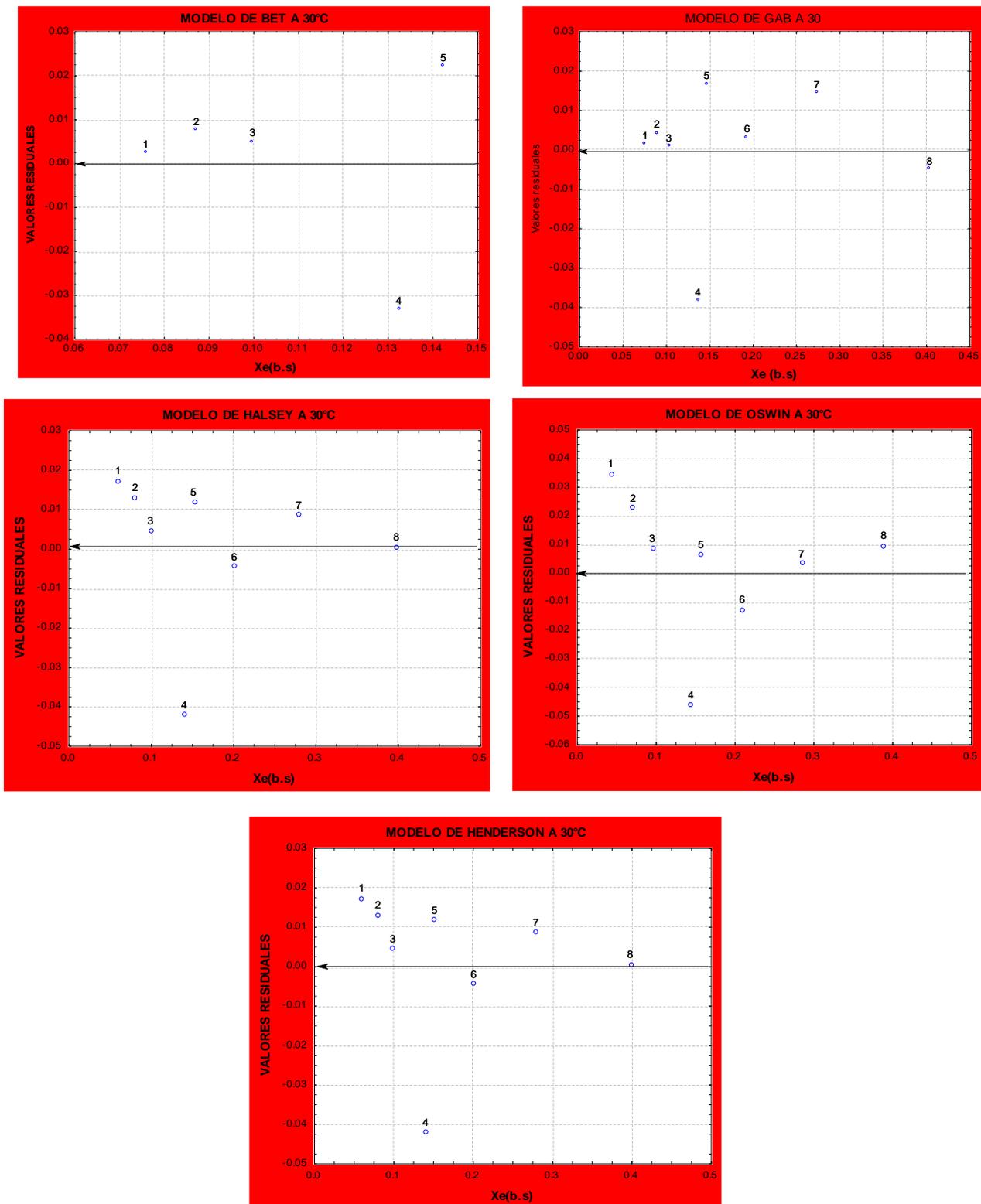


Figura 19: Distribución de residuos de los modelos de isotermas utilizados para la obtención de las isotermas de adsorción para la harina de castaña a 30°C.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 04: EVALUACION DE LOS RESIDUALES EN LAS ISOTERMAS DE ADSORCION PARA LA HARINA DE CASTAÑA (*Bertholletia excelsa* H.B.K.)

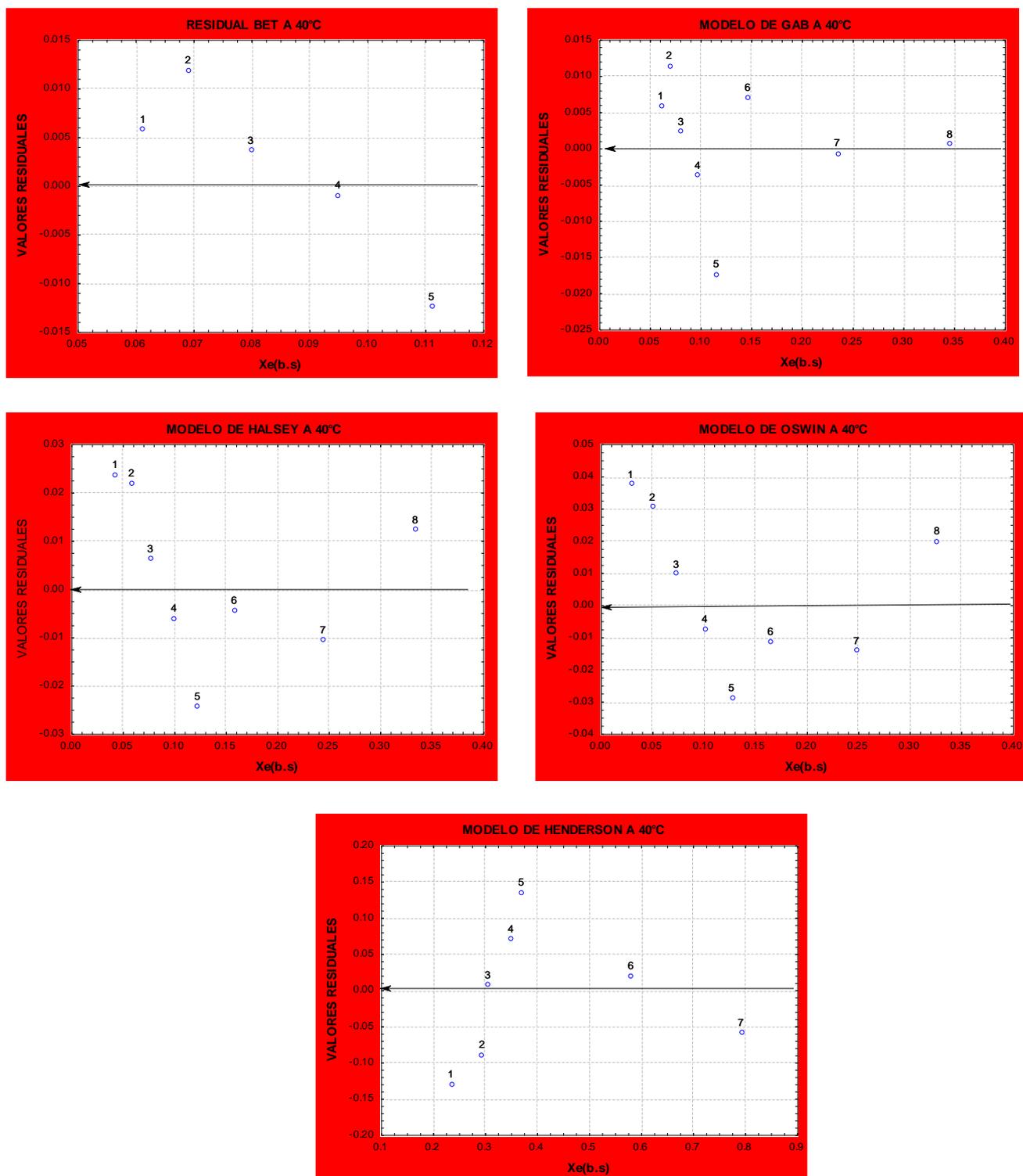


Figura 20: Distribución de residuos de los modelos de isotermas utilizados para la obtención de las isotermas de adsorción para la harina de castaña a 40°C.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 05: EVALUACION DE LOS RESIDUALES EN LAS ISOTERMAS DE ADSORCION PARA LA HARINA DE CASTAÑA (*Bertholletia excelsa* H.B.K.)

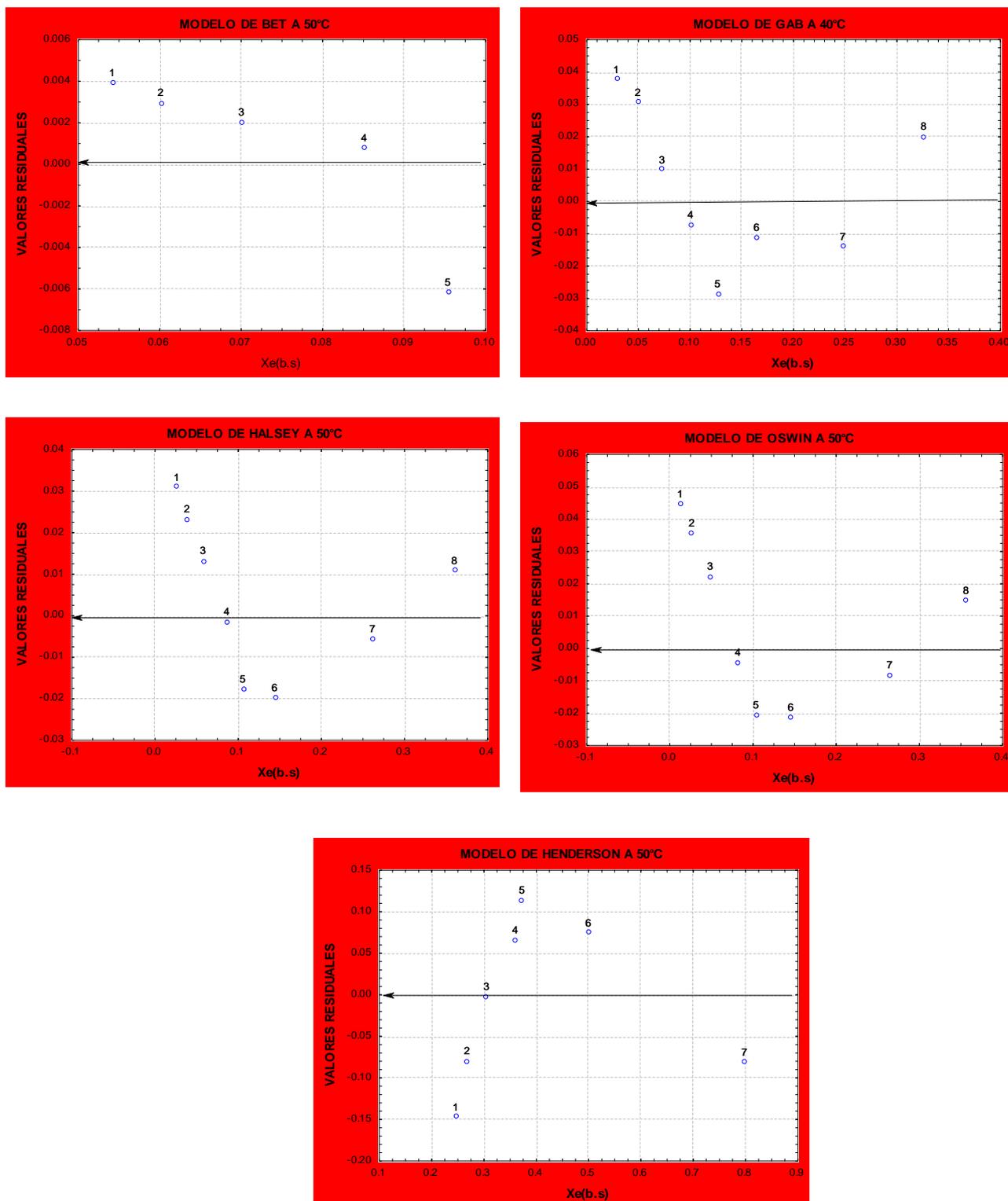


Figura 21: Distribución de residuos de los modelos de isotermas utilizados para la obtención de las isotermas de adsorción para la harina de castaña a 50°C.

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 06: PARAMETROS a_w Y q_{st} DETERMINADOS A PARTIR DEL MODELO HALSEY CONSIDERANDO EL RANGO DE X_e DE 0.06 a 0.15g de agua/g m.s. A LAS TEMPERATURAS DE ESTUDIO.

ANEXO 6.1 PARAMETROS DEL MODELO DE HALSEY

30°C		40°C		50°C	
A	B	A	B	A	B
0.029272	1.492584	0.040974	1.382321	0.052263	1.292375

a: **Parámetros estimados con un nivel de significancia del 5%.**

ANEXO 6.2: VALORES DE ACTIVIDADES DE AGUA DETERMINADOS MEDIANTE EL MODELO DE HALSEY.

30°C		40°C		50°C	
X_e	a_w	X_e	a_w	X_e	a_w
0.0679	0.197786	0.0679	0.185199	0.0679	0.184737
0.0797	0.278932	0.0797	0.258670	0.0797	0.253142
0.0869	0.325575	0.0869	0.301245	0.0869	0.292726
0.0931	0.363517	0.0931	0.336127	0.0931	0.325202
0.1175	0.489184	0.1175	0.453668	0.1175	0.435366
0.1591	0.634347	0.1591	0.594396	0.1591	0.569832
0.2604	0.804011	0.2604	0.768557	0.2604	0.742676
0.3730	0.880242	0.3730	0.852012	0.3730	0.829491

ANEXO 6.3: VALORES DE $\ln(a_w)$ Y $1/T$ (K^{-1}) A LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO CORRESPONDIENTE.

HUMEDAD DE EQUILIBRIO, X_e (b.s.)

	0.0679	0.0797	0.0869	0.0931	0.1175	0.1591	0.2604	0.3730
$1/T(K^{-1})$	$\ln(a_w)$							
0.00330	1.6205	1.2767	1.1221	1.0119	0.7150	0.4551	0.2181	0.1275
0.00319	1.6863	1.3522	1.1998	1.0902	0.7903	0.5202	0.2632	0.1601
0.00309	1.6888	1.3738	1.2285	1.1233	0.8315	0.5624	0.2975	0.1869

ANEXO 6.4: VALORES DE q_{st} DETERMINADOS POR LA ECUACIÓN DE Clausius Clayperon y Tsami.

X_e (b.s.)	$q_{st}(\text{kJ/mol})^a$ Experimental ^b	$q_{st}(\text{kJ/mol})^a$ Calculado ^c
0.0679	-2.8059	-8.0550
0.0797	-3.9728	-8.1172
0.0869	-4.3509	-8.1556
0.0931	-4.5539	-8.1889
0.1175	-4.7596	-8.3207
0.1591	-4.3762	-8.5500
0.2604	-3.2351	-9.1362
0.3730	-2.4200	-9.8349

a: Los valores fueron calculados considerando un R de los gases ideales igual a $8.314 \text{ kJ/kmol k}^{-1}$

b: Valores obtenidos por la ecuación de Clausius – Clapeyron.

c: Valores obtenidos por la ecuación de Tsami et al, (1990), calculado a un nivel de significancia del 5%.

Fuente: **Elaboración propia.**

ANEXO 07: ENERGIA DE ACTIVACION E_a CALCULADOS A PARTIR DE LA ECUACION DE ARRHENIUS, PARA LOS PARAMETROS C_{GAB} , X_m Y K (evaluados a un nivel de significancia del 5%).

Anexo 7.1: Datos para el cálculo de la E_a de la X_m

T(°C)	X_m	T(°K)	Ln(X_m)	1/T(K ⁻¹)
30	0.0720	303.15	-2.6311	0.0033
40	0.0550	313.15	-2.9004	0.0032
50	0.0463	323.15	-3.0726	0.0031

$$R= 0.0083\text{kJ/ mol-k}$$

$$-E_a/R=2166.9781$$

$$E_a= 18.0163 \text{ kJ/ mol}$$

ANEXO 7.2: Datos para el cálculo de la E_a de la C_{GAB}

T(°C)	C_{GAB}	T(°K)	$\ln(C_{GAB})$	$1/T(K^{-1})$
30	170.3904	303.15	5.1381	0.0033
40	5821.927	313.15	8.6694	0.0032
50	392.1497	323.15	5.9716	0.0031

$$R = 0.008314 \text{ kJ/ mol-k}$$

$$-E_a/R = -4406.1310$$

$$E_a = -36.632573 \text{ kJ/ mol}$$

ANEXO 7.3: Datos para el cálculo de la E_a de la K_{GAB}

T(°C)	K_{GAB}	T(°K)	$\ln(K_{GAB})$	$1/T(K^{-1})$
30	0.98200	303.15	-0.0182	0.0033
40	1.04500	313.15	0.0440	0.0032
50	1.12900	323.15	0.1213	0.0031

$$R = 0.008314 \text{ kJ/ mol-k}$$

$$-E_a/R = -682.2520$$

$$E_a = -5.6722 \text{ kJ/ mol}$$

ANEXO 08: **Granulometría de la muestra harina de castaña (100 g).**

	Malla	Porcentaje
Retenido	60 ASTM	64%
Retenido	80 ASTM	46%
Total		100%

Los valores fueron calculados en el laboratorio ambiental regional.

Fuente: **Elaboración propia**

ANEXO 09: **Solubilidad de sales.****SOLUBILIDAD**

Cuando un soluto se disuelve, se rompe su red cristalina, venciendo las fuerzas de atracción que mantienen unidos a los iones. Es necesario superar la energía de red, y esto se consigue con la hidratación (atracción entre los iones y las moléculas de agua). En general, la energía de hidratación es menor que la energía de red, por lo que el proceso de disolución es casi siempre exotérmico. De cualquier modo,

la relación entre los dos tipos de energía determina que un compuesto sea más o menos soluble.

La solubilidad es la capacidad que tiene una sustancia de disolverse otra; esto depende de los siguientes factores:

- La naturaleza o propiedades del soluto y del solvente
- La temperatura
- La presión
- El pH

SOLUBILIDAD DE SALES EN AGUA.

SON SOLUBLES:

Todos los acetatos, Nitratos, Nitritos, Cloratos y percloratos

Todos los cloruros, bromuros y Yoduros excepto los de Plata, Mercurio (I), Cobre (I) y Plomo.

Todos los Sulfatos, excepto los sulfato de bario, estroncio, plomo, mercurio, calcio y plata.

Todas las sales de Amonio (NH_4^+) y los correspondientes a los metales del grupo I.

SON INSOLUBLES

Todos los carbonatos, fosfatos, arseniados, Sulfitos, boratos y silicatos excepto los del grupo I

Todos los hidróxidos, excepto los del grupo I, y ,Ba, NH_4OH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Todos los sulfuros, son insolubles, excepto los del grupo I, II y el $(\text{NH}_4)_2\text{S}$.