

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE  
MADRE DE DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL**



**“DETERMINACIÓN DE LAS ISOTERMAS  
DE ADSORCIÓN DEL AJÍ (*Capsicum annuum*  
L.) SECO”**

**TESIS**

Presentado por el Bachiller:

**PALMER VICENTE PULLA HUILLCA**

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**PUERTO MALDONADO – PERÚ**

2011





**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE  
MADRE DE DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL**

**“DETERMINACIÓN DE LAS ISOTERMAS  
DE ADSORCIÓN DEL AJÍ (*Capsicum  
annuum* L.) SECO”**

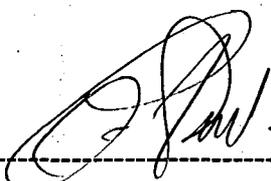
Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

Presentado por el Bachiller:

**PALMER VICENTE PULLA HUILLCA**

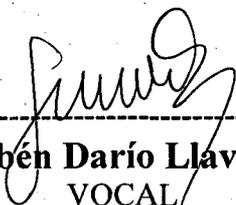
SUSTENTADA Y APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



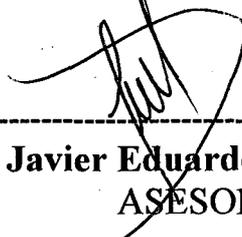
-----  
**Ing. Julián Colquehuanca Vilca**  
PRESIDENTE



-----  
**Ing. M.Sc. María Isabel Cajo Pinche**  
SECRETARIO



-----  
**Ing. Rubén Darío Llave Cortéz**  
VOCAL



-----  
**Ing. Javier Eduardo Díaz Viteri**  
ASESOR

**PUERTO MALDONADO – PERÚ**

**2011**

*No se trata de hacer todo lo que uno quiere, sino de querer las cosas que uno hace.*

**Anónimo.**

*Aprender es la única cosa de que la mente nunca se cansa, nunca tiene miedo y nunca se arrepiente.*

**Leonardo Da Vinci.**

*Jamás considere sus estudios como una obligación, sino como una oportunidad envidiable para aprender la influencia libertadora de la belleza del reino del espíritu, para su propio placer personal y para el provecho de la comunidad a la cual su futuro trabajo pertenece.*

**Albert Einstein.**

## DEDICATORIA

*A mis queridos padres **María Elena** y **Agripino**, con mucho amor y eterna gratitud, por todo su apoyo, amor y confianza en todos los momentos de mi vida y por darme la mayor riqueza, mi educación.*

*A mis hermanos: **Jorge**, **Mily** y **María Elena** por el apoyo, comprensión y colaboración incondicional en el logro de mis anhelos.*

**Palmer.**

## AGRADECIMIENTO

- *A Dios por el don de la vida, por las personas colocadas en mi camino y fundamentalmente por haber sido misericordioso, estando siempre presente en mi vida, guiando mis pensamientos y acciones en los momentos más difíciles.*
- *Al Ing. Javier Eduardo Díaz Viteri (Asesor), por el asesoramiento y la amistad brindada en el presente trabajo de investigación y durante mi vida universitaria.*
- *Al Dr. Baltazar Nicolás Cáceres Huambo (Co-asesor), docente de la Carrera Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC mi eterno agradecimiento por el asesoramiento, confianza, paciencia y sobre todo por la amistad brindada durante la realización del presente trabajo de investigación, ya que sin su valiosa e importante ayuda no habría sido posible llegar a concluirlo.*
- *A la M.Sc. Mery Luz Masco Arriola, docente de la Carrera Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-UNSAAC, por la amistad y la facilidad brindada en el uso del Laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Carrera Profesional de Ingeniería Química, lo cual permitió la culminación del presente trabajo de investigación.*
- *A mi Madre la Sra. María Elena Huilca Gonzáles, mi gran incentivadora, ejemplo de vida, amor y dedicación, por su apoyo incondicional desde el inicio hasta la culminación del presente trabajo de investigación.*
- *A los Miembros de Jurado conformado por el Ing. Julián Colquehuanca Vilca, Ing. M.Sc. María Isabel Cajo Pinche y Ing. Rubén Darío Llave Cortéz, por sus valiosas sugerencias, lo cual contribuyó al enriquecimiento del presente trabajo.*

- *A mi amigo el Ing. Larry Chañi Paucar, por su amistad, colaboración y la facilidad brindada para el uso de los Laboratorios de Procesos Agroindustriales y Química de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios-UNAMAD.*
  
- *Finalmente un agradecimiento a todas aquellas personas que colaboraron en forma directa e indirecta durante la ejecución del presente trabajo.*

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
SIMBOLOGÍA .....	xiv
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. ANTECEDENTES .....	4
2.2. GENERALIDADES DEL AJÍ .....	7
2.2.1. Clasificación taxonómica .....	8
2.2.2. Ecología .....	9
2.2.3. Composición química .....	10
2.2.4. Usos y potencial comercial .....	12
2.3. EL AGUA EN LOS ALIMENTOS .....	13
2.4. ACTIVIDAD DE AGUA .....	13
2.5. ISOTERMAS DE SORCIÓN .....	15
2.5.1. Interés de las isotermas de sorción para la tecnología alimentaria .....	17
2.5.2. Clasificación de las isotermas de sorción .....	17
2.5.3. Efecto de la temperatura en las isotermas .....	19
2.5.4. Modelos matemáticos para las isotermas de sorción .....	20
2.5.4.1. Modelo de BET ( Brunauer, Emmet y Teller) .....	20
2.5.4.2. Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer) .....	21
2.5.4.3. Modelo de Halsey .....	22
2.5.4.4. Modelo de Oswin .....	23
2.5.4.5. Modelo de Chung-Pfost .....	23
2.5.4.6. Modelo de Henderson .....	23
2.5.5. Calidad de ajuste de los modelos matemáticos .....	24
2.5.6. Métodos de medición de isotermas de sorción .....	25
2.6. CALOR ISOSTÉRICO DE SORCIÓN .....	26

2.7.	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN .....	29
2.8.	ALMACENAMIENTO .....	30
2.8.1.	Factores que alteran los alimentos almacenados .....	31
2.8.1.1.	Temperatura .....	31
2.8.1.2.	Humedad relativa .....	32
2.8.1.3.	Atmósfera ambiente .....	33
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	34
3.1.	LUGAR DE EJECUCIÓN .....	34
3.2.	MATERIALES .....	34
3.2.1.	Materia prima .....	34
3.2.2.	Reactivos (sales) .....	35
3.2.3.	Equipos de laboratorio .....	35
3.2.4.	Materiales .....	35
3.2.5.	Soluciones químicas de desinfección .....	36
3.3.	METODOLOGÍA .....	36
3.3.1.	Caracterización de la materia prima .....	36
3.3.2.	Acondicionamiento de las muestras .....	37
3.3.2.1.	Selección .....	38
3.3.2.2.	Lavado/desinfección .....	39
3.3.2.3.	Escaldado .....	39
3.3.2.4.	Drenado .....	39
3.3.2.5.	Secado .....	39
3.3.2.6.	Almacenado .....	40
3.3.3.	Isotermas de adsorción .....	41
3.3.4.	Determinación de la humedad de equilibrio .....	44
3.3.5.	Ajuste matemático de las isotermas de adsorción.....	44
3.3.6.	Determinación de la monocapa del modelo de GAB .....	45
3.3.7.	Determinación del calor isostérico de adsorción .....	45
3.3.8.	Determinación de la energía de activación .....	46
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	48
4.1.	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO .....	48
4.2.	HUMEDAD DE EQUILIBRIO .....	49

4.3.	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN .....	50
4.4.	AJUSTE DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN .....	52
4.5.	CALOR ISOSTÉRICO DE ADSORCIÓN .....	63
4.6.	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN .....	67
V.	CONCLUSIONES .....	69
VI.	RECOMENDACIONES .....	71
VII.	BIBLIOGRAFÍA .....	72
	ANEXOS .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición de 100 g de diferentes variedades de ajíes .....	11
Tabla 2. Métodos para la determinación de las isothermas de sorción .....	26
Tabla 3. Tolerancia a la temperatura de los microorganismos .....	32
Tabla 4. Tipos de análisis fisicoquímicos realizados en el Ají seco y sus respectivas normas de determinación .....	37
Tabla 5. Variación de las humedades relativas de equilibrio (%) en función de las tres temperaturas utilizadas en el experimento .....	41
Tabla 6. Sales y ecuaciones utilizadas para obtener la $a_w$ o humedad relativa (%) a una temperatura (°K) determinada .....	42
Tabla 7. Cantidad de sal y agua recomendadas para la preparación de soluciones salinas saturadas .....	43
Tabla 8. Composición fisicoquímica del ají seco ( <i>Capsicum annum</i> L.) .....	48
Tabla 9. Valores de humedad de equilibrio, $X_c$ (g agua/g m.s.) experimental de las muestras secas de ají en función de la actividad de agua ( $a_w$ ) a las temperaturas de estudio ...	49
Tabla 10. Parámetros de ajuste de las isothermas de adsorción del ají seco 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 25°C .....	53
Tabla 11. Parámetros de ajuste de las isothermas de adsorción del ají seco 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 35°C .....	54
Tabla 12. Parámetros de ajuste de las isothermas de adsorción del ají seco 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 13. Calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) del ají seco a diferentes valores de humedad de equilibrio .....	63
Tabla 14. Parámetros $q_0$ y $X_0$ y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustados de la ecuación de Tsami <i>et al.</i> (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 GAB .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Planta (A) y frutos verdes (B) y maduros (C) del ají “ojito de pescado” ( <i>Capsicum annuum</i> L.) .....	9
Figura 2. Partes del Ají “ojito de pescado” ( <i>Capsicum annuum</i> L.) .....	10
Figura 3. Isotermas de Adsorción y de Desorción .....	16
Figura 4. Los cinco tipos de isotermas de adsorción de Van der Waals .....	18
Figura 5. Influencia de la temperatura en las isotermas de adsorción .....	19
Figura 6. Relación de Clausius-Clapeyron para distintos contenidos de humedad .....	28
Figura 7. Diagrama de operaciones para el secado del ají ( <i>Capsicum annuum</i> L.) .....	38
Figura 8. Muestras secas de ají almacenadas en envases de vidrio cubierto con papel aluminio .....	40
Figura 9. Diagrama de flujo para la determinación de las isotermas de adsorción del ají seco .....	47
Figura 10. Isotermas de adsorción para el ají ( <i>Capsicum annuum</i> L.) seco a las temperaturas de estudio .....	51
Figura 11. Isotermas de adsorción del ají seco a diferentes temperaturas ajustadas mediante el modelo de GAB .....	57
Figura 12. Isotermas de adsorción del ají seco a diferentes temperaturas ajustadas mediante el modelo de Halsey .....	57
Figura 13. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos de GAB y Halsey para el ají seco a la temperatura de 25°C .....	58
Figura 14. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos de GAB y Halsey para el ají seco a la temperatura de 35°C .....	58
Figura 15. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos de GAB y Halsey para el ají	

seco a la temperatura de 40°C .....	59
Figura 16. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos indicados para el ají seco a la temperatura de 25°C .....	59
Figura 17. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos indicados para el ají seco a la temperatura de 35°C .....	60
Figura 18. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos indicados para el ají seco a la temperatura de 40°C .....	60
Figura 19. Curvas de $\ln(a_w)$ versus $1/T$ a diferentes humedades de equilibrio para el ají seco .....	64
Figura 20. Influencia de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en el calor de adsorción ( $q_{st}$ ) para el ají seco .....	65

## SIMBOLOGÍA

$a_w$	=	Actividad de agua.
$f$	=	Fugacidad de la solución.
$f_0$	=	Fugacidad del solvente puro.
$P$	=	Presión parcial de vapor de agua en el sistema (alimento).
$P_0$	=	Presión de saturación del agua líquida pura a la misma temperatura.
HRE	=	Humedad relativa de equilibrio.
$X_e$	=	Humedad de equilibrio (g agua/g m.s.).
$X_m$	=	Humedad de la monocapa (g agua/g m.s.).
$C_{BET}$	=	Constante de BET relacionada al calor de sorción.
$C_{GAB}$	=	Constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa.
$K_{GAB}$	=	Es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.
A y B	=	Constantes características de las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6 que dependen de la temperatura y naturaleza del producto.
R	=	Constante universal de los gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .
T	=	Temperatura absoluta (°K).
$k y n$	=	Constantes características de la ecuación 2.7 que dependen de la temperatura y naturaleza del producto.
P	=	Desvío porcentual medio (%).
SEM	=	Error estándar de humedad
N	=	Número de puntos experimentales.
n	=	Número de constantes en el modelo.
$X_{ci}$	=	Contenido de humedad de equilibrio experimental (g agua/g m.s.).

- $X_{ci}$  = Contenido de humedad de equilibrio calculada a partir de cada modelo (g agua/g m.s.).
- $R^2$  = Coeficiente de determinación.
- $Q_{st}$  = Calor isostérico total de sorción (kJ/mol).
- $q_{st}$  = Calor isostérico neto de sorción (kJ/mol).
- $\lambda$  = Calor de vaporización del agua pura (kJ/mol).
- $q_0$  = Calor isostérico de sorción de la primera molécula de agua (kJ/mol).
- $X_0$  = Contenido de humedad inicial del material alimenticio (g agua/g m.s.).
- $D$  = Constante en estudio.
- $D_0$  = Factor de Arrhenius.
- $E_a$  = Energía de activación (kJ/kmol).
- $m_{eq}$  = Masa de la muestra en el equilibrio (g).
- $m_s$  = Masa de la muestra seca (g).
- b.s. = Base seca.

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo la obtención de las isothermas de adsorción del ají (*Capsicum annuum* L.) seco. Las isothermas fueron determinadas a las temperaturas de 25°C, 35°C y 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 observó que la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) disminuye con el incremento de la temperatura 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 ajustaron al comportamiento experimental de adsorción del ají seco, presentando valores de coeficientes de determinación  $R^2$  superiores al 96%, desvío porcentual medio P menores del 10%, errores estimados de humedad SEM inferiores a 0.022 y una distribución aleatoria de los residuales.

La humedad de la monocapa  $X_m$  del modelo de GAB presentó dependencia con la temperatura, disminuyendo de 0.0850 a 0.0707 g agua/g m.s., en un rango de temperatura de 25°C a 40°C. A partir del modelo de Halsey se calculó los valores de  $X_e$  y  $a_w$  para obtener los valores del calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ), calculados utilizando la ecuación de Clausius-Clapeyron, observándose que los valores  $q_{st}$  disminuyen con el incremento del contenido de humedad en el ají seco, disminuyendo de 23.6429 a 0.0075 kJ/mol para humedades de 0.06 g agua/g m.s. a 0.32 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 10.1597 kJ/mol y 4.5212 kJ/mol respectivamente.

**Palabras clave:** Ají “ojito de pescado” (*Capsicum annuum* L.), isothermas de adsorción, calor isostérico, energía de activación.

## ABSTRACT

The present work aimed to obtain the adsorption isotherms of dry chili (*Capsicum annuum* L.). The isotherms were determined at temperatures of 25°C, 35°C and 40°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 dried pepper exhibited type III behavior, characteristic of materials rich in carbohydrates. 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 six isotherm models commonly applied in food (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost 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 96%, 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 0.0850 to 0.0707 g water/g dry matter in a temperature range of 25°C to 40°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 23.6429 to 0.0075 kJ/mol for moisture of 0.06 g water/g dry matter a 0.32 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 10.1597 kJ/mol and 4.5212 kJ/mol respectively.

**Key words:** Chili “Fish darling” (*Capsicum annuum* L.), adsorption isotherms, isosteric heat, activation energy.

## I. INTRODUCCIÓN

El ají fruto de la familia de las Solanaceas, perteneciente al género *Capsicum*, es una hortaliza típica de la Amazonía Peruana, su sabor característico y particularmente la pungencia (picante) que presenta la dotan de gran consideración y aceptación por parte de los consumidores. En el departamento de Madre de Dios existen diversas especies de ajíes, destacándose entre ellas el *Capsicum annuum* L. o popularmente conocido como “ojito de pescado”, este y otras especies son utilizadas en la gastronomía local debido a su fragancia y sabor típico, considerándolos un elemento casi esencial en la preparación y acompañamiento de las comidas.

El ají seco, molido o en la forma de oleorresinas (extracto que contiene propiedades pigmentantes y pungentes) es un producto de gran aplicación en la industria de alimentos, siendo uno de los colorantes naturales más utilizados en el sector alimentario (Barbosa, 2003), así también es uno de los principales condimentos a nivel mundial (Hernández *et al.*, 2009). Los colorantes del ají seco no solo son aplicados en el área de alimentos, sino también en la industria farmacéutica y cosmética (Barbosa, 2003). El color es la principal característica de calidad del ají seco, para lo cual son necesarios los cuidados durante el proceso de secado y almacenamiento (Silva, 1999).

Durante el almacenamiento, los alimentos deshidratados incrementan su humedad hasta llegar a un límite de aceptación que corresponde a una actividad de agua ( $a_w$ ) crítica; a partir de ello el producto manifiesta un deterioro que puede ser físico, químico o microbiológico, el cual provoca una disminución de su calidad y vida útil. El *Capsicum annuum* L. seco, a pesar de ser un producto con un bajo contenido de humedad puede sufrir diversas reacciones de deterioro, ya que debido a su naturaleza tiene la capacidad de adsorber agua del ambiente, comprometiendo su calidad sino se encuentra a condiciones adecuadas de almacenamiento.

El conocimiento de las isotermas de sorción de agua y el calor isostérico de sorción son esencialmente importantes para varios procesos de alimentos, como el secado, almacenamiento y embalaje, ya que ayudan a calcular el tiempo de secado, modelar la variación de humedad durante el almacenamiento y seleccionar el material adecuado de empaque (Gabas *et al.*, 2009). También brindan información acerca de los mecanismos de sorción y las interacciones entre los componentes del alimento y el agua (Telis-Romero *et al.*, 2005).

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.

Por tal razón, la presente investigación se planificó para determinar las isotermas de adsorción del ají seco (*Capsicum annuum* L.) 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, ya que este producto presenta un gran potencial como colorante natural, en la industria de alimentos, industria farmacéutica y cosmética, el cual puede ser aprovechado en gran medida, debido a que esta especie de ají (*Capsicum annuum* L.) se encuentra en abundancia en la región..

Este trabajo tuvo como objetivo principal la determinación de las isotermas de adsorción del ají (*Capsicum annuum* L.) seco.

Los objetivos específicos fueron:

- Obtener los datos experimentales de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) del ají seco en función de la actividad de agua,  $a_w$  (Humedad relativa) a diferentes temperaturas.

- Modelar las isothermas de adsorción del ají seco, utilizando seis modelos comúnmente aplicados en alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost y Henderson).
- Determinar el contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) del ají seco a través del modelo de GAB.
- Determinar el calor isostérico de adsorción y modelarlo en función del contenido de humedad del ají seco a través de la ecuación exponencial de Tsami *et al.* (1990).
- Determinar la energía de activación de los parámetros termodinámicos del modelo de GAB ( $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $K_{GAB}$ ).

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. ANTECEDENTES

Silva *et al.* (2002), estudiaron las isothermas y el calor isostérico de sorción en pulpa de mango (*Mangifera indica* L.). Las isothermas de la pulpa de mango fue determinada a las temperaturas de 20, 40 y 60°C y humedades relativas del aire de 29.3 a 82.3%, hasta llegar a la humedad de equilibrio. Posteriormente, cinco modelos matemáticos de sorción (BET, GAB, Halsey, Oswin y Smith) fueron ajustados a los datos experimentales con la finalidad de obtenerse los parámetros de dichos modelos y escoger aquel que mejor representa las isothermas, para el cálculo del calor isostérico de sorción. La elección del mejor ajuste se dio en función del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el desvío medio relativo (P). De acuerdo con los resultados, el modelo de GAB fue el que mejor se ajustó a las isothermas de sorción, los demás modelos también ajustaron satisfactoriamente a los datos experimentales, pudiendo ser empleados para el cálculo de la humedad de equilibrio higroscópico de la pulpa de mango y, aun, el calor de sorción varió positivamente de 104.50 a 355.36 kJ/kg.

Vega *et al.* (2006), determinaron las isothermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.) a tres temperaturas (7, 22 y 45°C) para el rango de actividad  $a_w$  entre 0.1 y 0.95. Las isothermas se modelaron utilizando siete ecuaciones comúnmente aplicadas en alimentos. La calidad 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 isostérico de adsorción ( $Q_s$ ) usando la ecuación de Clausius-Clapeyron, obteniéndose un máximo de 21 kJ/mol, para una humedad de 0.075 g agua/g m.s., este parámetro se modeló utilizando la ecuación propuesta por Tsami *et al.* (1990).

**Resende *et al.* (2006)**, estudiaron las isotermas y el calor isostérico de sorción del frejol (*Phaseolus vulgaris* L.). El contenido de la humedad de equilibrio de los granos de frejol fue determinado por el método dinámico-gravimétrico para temperaturas entre 25°C y 55°C y actividad de agua para cada temperatura, entre 0.20 y 0.75. Se observó que el contenido de humedad decrece con el aumento de la temperatura para una determinada actividad de agua semejante a los productos higroscópicos. Los datos experimentales fueron ajustados a diversos modelos matemáticos disponibles en la literatura (BET, Chung-Pfost, Copace, GAB, Halsey modificado, Henderson modificado, Oswin, Sabbah y Sigma Copace). Según los análisis estadísticos, el modelo de Halsey modificado fue el que describió mejor la higroscopicidad del frejol. A partir de los resultados obtenidos se calculó el calor isostérico para cada contenido de humedad de equilibrio. Se observó que el calor isostérico aumenta con la disminución del contenido de humedad del producto, indicando que la reducción del contenido de humedad aumenta la energía necesaria para la remoción de agua. Los valores de calor isostérico para los granos de frejol en un rango de humedad de 10.10 a 21.71 (% b. s.), varían de 3961 a 2718 kJ/kg.

**Gabas *et al.* (2009)**, estudiaron las propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo con encapsulantes. Los datos de humedad de equilibrio de polvo de pulpa de lulo (PL) con y sin aditivos – 58% de maltodextrina (MD) o 58% de goma Arábiga (GA) – fueron determinados a las temperaturas de 20, 30, 40 y 50 °C utilizando el método estático gravimétrico para un rango de actividades de agua entre 0.06 y 0.90. Las isotermas presentaron formato sigmoideal del tipo III, y el modelo de GAB fue ajustado satisfactoriamente a los datos experimentales de humedad de equilibrio en función de la actividad de agua. La adición de encapsulantes afectó las isotermas de tal manera que en la misma actividad de agua, las muestras PL + GA y PL + MD presentaron un menor contenido de humedad de equilibrio y no fueron afectadas por la variación de temperatura. Los calores isostéricos de sorción de las pulpas en polvo con encapsulantes fueron mayores (menos negativos) con relación a las pulpas de lulo en polvo, sugiriendo la existencia de sitios polares más activos en el producto sin adición de GA o MD. Una relación exponencial empírica fue

utilizada para describir la dependencia del calor de sorción con el contenido de humedad del material.

**Choque, (2009)**, determinó las isothermas de adsorción del Maíz Morado (*Zea mays* L.) de la variedad "Canteño", a las temperaturas de 18, 25 y 30° C, para el rango de  $a_w$  de agua de 0.065 a 0.95; se utilizaron 7 modelos matemáticos, siendo los modelos de GAB y Halsey los que mejor se ajustaron al comportamiento experimental de adsorción del maíz morado. Se observó que la humedad de equilibrio disminuye con el incremento de la temperatura, es así que ocurre un entrecruzamiento de las isothermas a la  $a_w$  de 0.70 para una humedad de equilibrio,  $X_e$ , de 0.17 g de agua/g m.s. La humedad de la monocapa ( $X_m$ ), presentó dependencia con la temperatura, disminuyendo de 0.079 a 0.065 g de agua/g m.s en el rango de temperaturas de 18 a 30°C; observó también que los datos de calor isostérico aumenta con la disminución de la humedad de equilibrio de 0.016 a 7.712 kJ/g para el rango de humedad de equilibrio de 0.07 a 0.17 g de agua/g m.s. así mismo calculó la energía de activación utilizando la ecuación de Arrhenius para los modelos termodinámicos  $X_m$  y  $C_{GAB}$ , presentando valores de 11.46 y 7.28 kJ/kg respectivamente.

**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 contenido de humedad de equilibrio disminuyo con el aumento de la temperatura (20, 30, 40 y 50°C respectivamente). El contenido de humedad de equilibrio de todas las muestras aumento con el incremento de la actividad de agua, a temperatura constante. La humedad de sorción de las muestras de jengibre con cáscara fue mayor que las muestras de jengibre sin cáscara, mientras que las muestras de jengibre no escaldados con y sin cáscara fue mayor que las muestras de jengibre escaldado con y sin cáscara. La ecuación de Henderson permite previsiones más exactas de las isothermas, describiendo mejor los datos de adsorción que los modelos de GAB, Oswin y Halsey. La humedad de la monocapa, en general, disminuye con la temperatura para todas las muestras.

El calor isostérico disminuye cuando el contenido de humedad se aproxima al valor asintótico o al calor latente de vaporización de agua pura ( $\Delta H_{st} = 0$ ), mientras que la entropía de sorción aumenta con el contenido de humedad.

## 2.2. GENERALIDADES DEL AJÍ

Según Vélez (1991), citado por Melgarejo *et al.* (2004) el ají es originario del continente Americano (Bolivia, Perú, sur de México y Colombia) cuenta con cerca de 25 especies silvestres y 5 domesticadas (*Capsicum chinense* Jacq., *Capsicum annuum* L., *Capsicum pubescens* R & P, *Capsicum frutescens* L., y *Capsicum baccatum* L). En la actualidad el que más se cultiva en el mundo es *Capsicum annuum* L.

Se piensa que el ají fue una de las primeras especies domesticadas en Sur América, presentándose actualmente como un género cosmopolita, aunque su distribución natural va desde el sur de los Estados Unidos hasta Argentina (Arias y Melgarejo, 2000, citado por Melgarejo *et al.*, 2004).

El color de fruto en estado maduro presenta 9 categorías: Amarillo limón, Amarillo naranja pálido, Amarillo naranja, Naranja pálido, Naranja, Rojo claro, Rojo oscuro, Morado y Marrón. En las especies *C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. baccatum* el color predominante es el rojo (Melgarejo *et al.*, 2004).

La forma del fruto en los *Capsicum* al igual que el color presenta una alta variabilidad, formas de fruto elongado, casi redondo, triangular, acampanulado en bloque y acorazonado, son observados en los *C. annuum*, *C. chinense* y *C. frutescens*, siendo predominante para las dos primeras especies la forma elongada; en *C. frutescens* la predominante es la forma casi redonda, en *C. baccatum* además de presentar las formas elongadas y casi redonda predomina la forma acampanulado en bloque; *C. pubescens* presenta la forma casi redonda y acampanulado en bloque (Melgarejo *et al.*, 2004). La longitud del fruto en el *C. annuum* varía

entre 2.1-5.0 cm al igual que *C. chinense*; *C. frutescens* presenta una longitud menor de 2.0 cm. el *C. pubescens* presenta longitudes que varían de 5.1 a 8.0 cm y el *C. baccatum* presentó longitudes entre 2.1-8.0 cm. El ancho del fruto para el *C. annum*, *C. chinense* y *C. frutescens* es de >3.1 cm. En *C. pubescens* presenta frutos entre 2.1- 5.0 cm. El peso de los frutos varía de 1-3 g (Melgarejo *et al.*, 2004).

La producción mundial de ají se calcula en 18'024.719 toneladas de fruta, encontrándose que Asia es el continente donde principalmente se cultiva y en el que China, Japón y Taiwán son los principales países productores (FAO, 1999, citado por Melgarejo *et al.*, 2004).

Según Mendonça *et al.* (2009) los ajíes del genero *Capsicum* siempre fueron usadas por los indios y civilizaciones antiguas para hacer a los alimentos más agradables al paladar, además de ser utilizados como conservantes en alimentos, son fuente de antioxidantes naturales como la vitamina E, vitamina C y carotenoides. Estos ajíes también son ricos en capsaicinoides, compuestos fenólicos responsables pelo sabor pungente o picante.

### 2.2.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Según Rengifo *et al.* (2001), la clasificación taxonómica del ají "ojito de pescado" es la siguiente:

Reino : Plantae

División : Spermatophyta

Clase : Dicotiledónea

Orden : Solanales

Familia: Solanaceae

Género : *Capsicum*

Especie : *annuum* L.

Nombre común : Ají ojito de pescado

### 2.2.2. ECOLOGÍA

El ají es una especie adaptada a climas tropicales húmedos con y sin estación seca marcada. Crece bien en condiciones de alta humedad relativa en el aire y altitudes entre el nivel del mar y los 500 m. Tiene poca tolerancia a las heladas (Villachica, 1996).

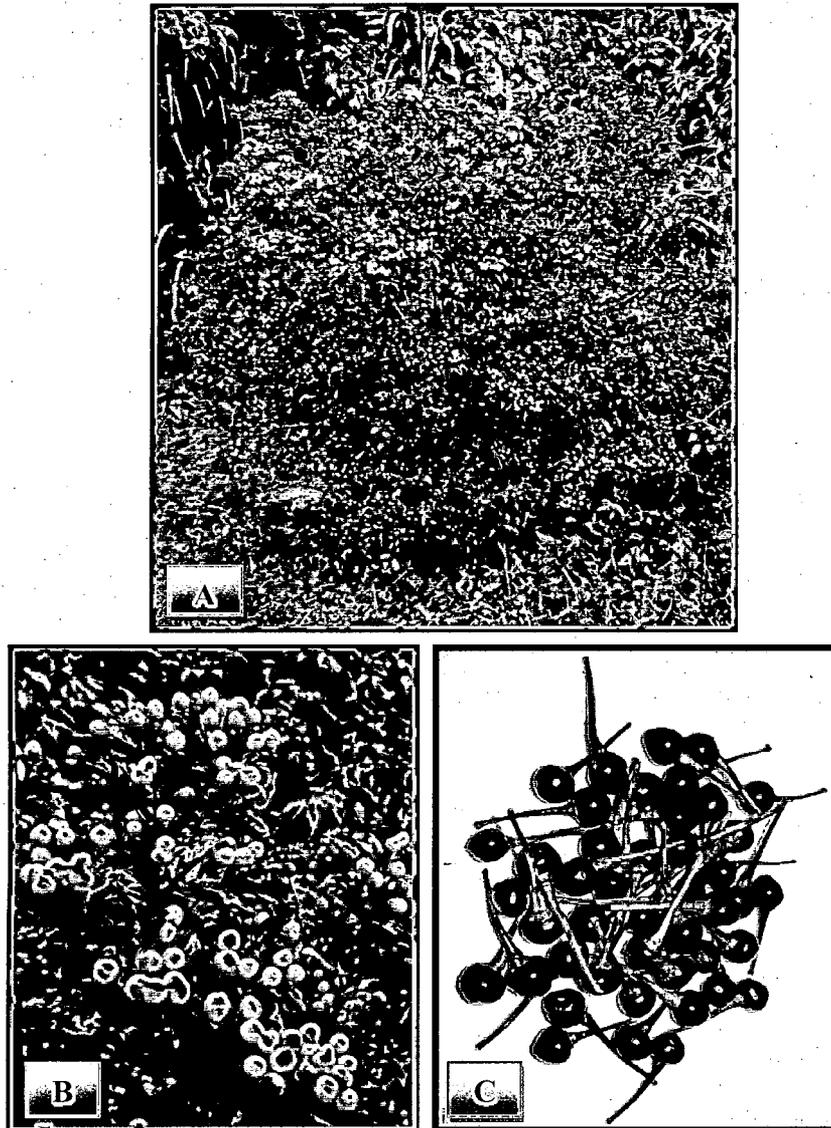


Figura 1. Planta (A) y frutos verdes (B) y maduros (C) del ají “ojito de pescado” (*Capsicum annum* L.)

Fuente: Elaboración propia (2011).

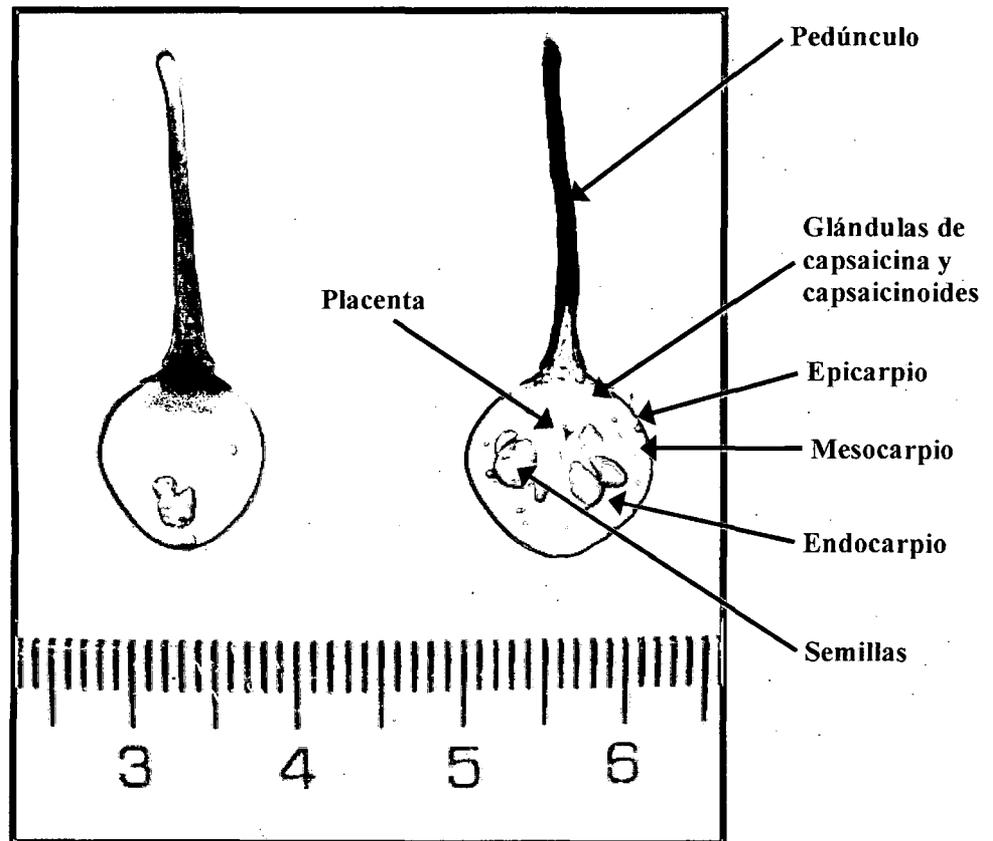


Figura 2. Partes del Ají “ojito de pescado” (*Capsicum annuum* L.)

Fuente: Elaboración propia (2011).

### 2.2.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Uno de los principales componentes del ají es la capsaicina (8-metil-N-vanilil-6-nonenamida;  $C_{18}H_{27}NO_3$ ), sustancia que pertenece a la familia de los vaniloides (Vergara, 2006).

Según Hernández *et al.* (2009) la sensación pungente que aporta esta hortaliza se debe a la presencia de 16 alcaloides homólogos, a los que en forma genérica se les identifica como capsaicinoides. De estos, la capsaicina es la más abundante, que alcanza hasta el 85% de los capsaicinoides totales en el fruto, dependiendo de la variedad. Los capsaicinoides se

encuentran en una mayor concentración en la placenta del fruto, estructura a la que se adhieren las semillas.

**Villachica (1996)**, indica que la pungencia es muy variable, fluctuando entre 56 000 y 250 000 Unidades Scoville (U.S), llegando en algunas variedades a 380 000 U.S. Se considera que 10 000 U.S de pungencia es adecuado para el consumo de ají deshidratado puro, mientras que en las mezclas de alimentos la pungencia debe estar alrededor de 5 000 U.S.

La composición química promedio de los ajíes según **Villachica (1996)** se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. **Composición de 100 g de diferentes variedades de ajíes.**

<b>Componente</b>	<b>Valor/unidad</b>
Agua	8500 a 89.0 g
Valor energético	40.0 a 60.0 cal.
Proteínas	0.9 a 2.5 g
Grasas	0.7 a 0.8 g
Carbohidratos	8.8 a 12.4 g
Fibra	2.4 a 2.9 g
Calcio	21.0 a 31.0 mg
Fósforo	21.0 a 58.0 mg
Fierro	0.9 a 1.3 mg
Caroteno	2.5 a 2.9 mg
Riboflavina	0.11 a 0.58 mg
Niacina	1.25 a 1.47 mg
Acido ascórbico	48.0 a 60.0 mg

Fuente: **Villachica (1996)**

#### 2.2.4. USOS Y POTENCIAL COMERCIAL

Los usos de los frutos ya sea en fresco o procesados son múltiples. Aparte del consumo fresco, cocido o como condimento o “especia” en comidas típicas de diversos países, existe una gran gama de productos industriales que se usan en la alimentación humana como congelados, deshidratados, encurtidos, enlatados, pastas y salsas (Gonzales y Orellana, 2003).

La capsaicina, es demandada por diferentes sectores productivos. Se usa como saborizante en la preparación de ciertas carnes frías, en la fabricación de cigarrillos, como repelente en la agricultura, contra mamíferos depredadores en la ganadería menor, como sustancia activa de las pinturas marinas para rechazar los caracolillos. Es también componente básico del llamado “pepper gas”, utilizado en el campo militar y de los atomizadores contra asaltantes (Gonzales y Orellana, 2003).

Según Restrepo *et al.* (2007), entre las oleorresinas más empleadas en la industria alimentaria están las del género *Capsicum*, debido a sus principios pigmentantes (colorante para queso, salchicha, mortadelas, salsa entre otros) y pungentes (para brindar sabor y aroma); también es usado en la industria farmacéutica donde es requerido como estimulante.

### 2.3. EL AGUA EN LOS ALIMENTOS

Según **Clemente (2003)**, el agua es el componente que domina los sistemas alimentarios, influyendo significativamente en las variables del proceso, las características del producto y los factores de estabilidad. Todos los alimentos contienen agua y es bien conocido que aquellos más susceptibles de degradación (tanto física como química) son los que contienen altos niveles de agua. El agua controla la mayoría de los fenómenos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren en los alimentos ya que constituye el medio de reacción y es el componente principal en la mayoría de ellos.

No obstante, también se ha observado que diferentes tipos de alimentos con el mismo contenido de agua difieren significativamente en su estabilidad o vida útil. En consecuencia, el contenido de agua por sí solo, no es un indicador real de la estabilidad. Esta situación se atribuye, en parte, a diferencias en la intensidad con que el agua se asocia con los constituyentes no acuosos; el agua implicada en asociaciones fuertes es menos susceptible o propensa para las actividades degradativas, tales como el crecimiento de microorganismos y las reacciones químicas de hidrólisis, que el agua débilmente asociada. El término “actividad de agua” ( $a_w$ ) se implantó para tener en cuenta la intensidad con que el agua se asocia a los diferentes compuestos no acuosos (**Fennema, 2000**).

### 2.4. ACTIVIDAD DE AGUA ( $a_w$ )

La actividad de agua ( $a_w$ ) es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas (por ejemplo oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacción de Maillard) y desarrollo microbiano (**Fennema, 2000**). Por esto la actividad de agua es un parámetro bastante usado como indicador para predecir la vida útil de un alimento. El concepto de  $a_w$  fue introducido en 1975 por el microbiólogo Scott y hoy en día se considera junto con la temperatura uno de los parámetros más importantes que influyen en las reacciones de deterioro de los alimentos (**Casp y Abril, 2003**, citado por **Choque, 2009**).

Según **Marques (2009)**, la actividad de agua ( $a_w$ ) es definida por la relación entre la presión parcial del vapor de agua en el alimento y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura. En el caso de agua pura, la relación entre las presiones es 1. Entretanto la actividad de agua de los alimentos es siempre inferior a 1, pues los constituyentes químicos presentes inmovilizan parcialmente el agua.

En la realidad, la actividad de agua es la relación entre la fugacidad de la solución ( $f$ ) y la fugacidad del solvente puro ( $f_o$ ). 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 considerarse que su comportamiento es ideal en la fase de vapor. (**Clemente, 2003**). La actividad de agua puede ser expresada por la siguiente ecuación.

$$a_w = \frac{f}{f_o} \approx \frac{P}{P_o} = \frac{\text{HRE}}{100} \quad (1)$$

Donde:

- P = Presión parcial de vapor de agua en el sistema (alimento).
- $P_o$  = Presión de saturación del agua líquida pura a la misma temperatura.
- 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 encuentra. En estas condiciones, el alimento no gana ni pierde agua (**Marques, 2009**).

Para materiales no higroscópicos la presión de vapor de la superficie es igual a la presión de vapor para el agua pura en la misma temperatura. Para un material higroscópico la presión de vapor de la superficie es más baja que la presión de vapor del agua pura, este hecho se debe mayormente a la estructura y la porosidad del material o alimento (**Heldman y Lund, 2007**, citado por **Choque, 2009**).

## 2.5. ISOTERMAS DE SORCIÓN

La isoterma de un producto relaciona gráficamente, a una temperatura constante, el contenido en humedad de equilibrio de un producto con la actividad termodinámica del agua del mismo, ya que en el equilibrio, este último parámetro es igual a la humedad relativa del aire que rodea al producto (Vega *et al.*, 2006).

Las isotermas de sorción de humedad para los alimentos representan las propiedades higroscópicas integradas 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).

Las isotermas de sorción de alimentos son obtenidas relacionándose en un gráfico la cantidad de agua sorbida, en función de la actividad de agua, generando mayormente curvas de formato sigmoide (Araujo, 2001). Una isoterma de sorción puede ser obtenida en dos direcciones: adsorción y desorción. La primera es obtenida cuando un material seco es colocado en varias atmósferas, aumentando la humedad relativa y midiendo el aumento de peso debido a la ganancia de agua. En la segunda, el material inicialmente húmedo es colocado bajo las mismas condiciones ambientales utilizadas en la adsorción, siendo medida la pérdida de peso, debido a la salida de agua (Kurozawa *et al.*, 2005).

Lo mencionado anteriormente puede observarse en la Figura 3, donde se aprecia las isotermas de adsorción y desorción de humedad características de productos alimenticios.

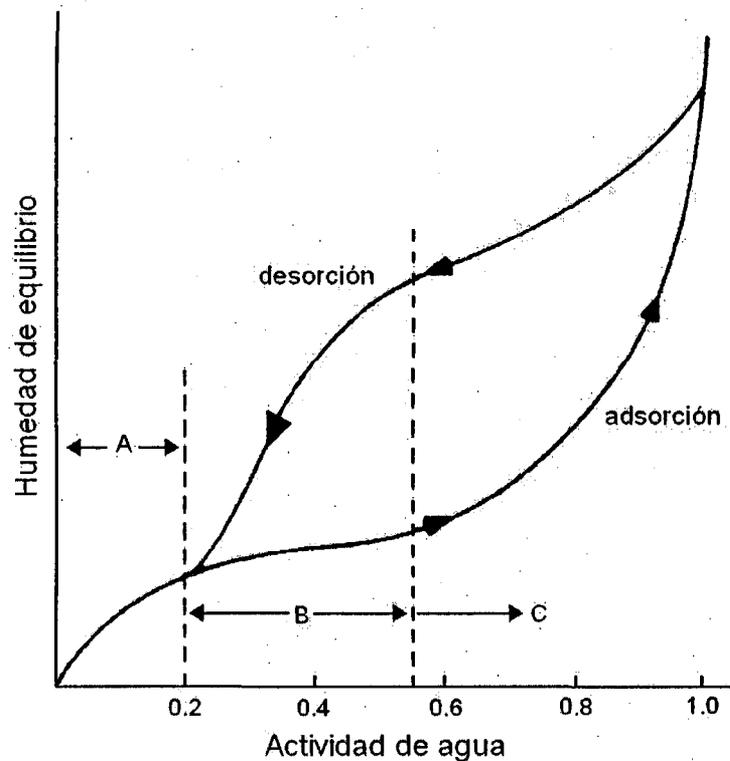


Figura 3. Isothermas de Adsorción y de Desorción.

Fuente: Badui (1999)

El desfase entre las curvas de adsorción y desorción de la Figura 3, se denomina Histéresis, y puede ocurrir debido a diversos factores tales como condensación capilar, cambios en la estructura física del material, impurezas en la superficie y cambio de fase (Labuza, 1984, citado por Choque, 2009), y se observa generalmente en productos altamente higroscópicos (Heldman y Lund, 2007, citados por Choque, 2009).

Las isothermas de los alimentos, se dividen en tres regiones (Figura 3) denotados por A, B y C. En la región A, las moléculas de agua están enérgicamente ligadas a los sitios específicos en el sólido, estos sitios contienen a los grupos hidroxil de los polisacáridos, carbonil y amino de las proteínas, uniéndose a través de puentes de hidrógeno y fuerzas ion-dipolo. Es así que esta agua no está disponible como solvente y por lo tanto no colabora

microbiológicamente, enzimáticamente o químicamente. A esta zona se le denomina monocapa. En la región B el agua se encuentra en multicapas, menos fuertemente unida, estando presente normalmente en pequeños capilares, y en la región C el agua se presenta estructuralmente y puede presentar soluciones sueltas en grandes capilares o en estado libre (Fellows, 2000; Shafiur, 2003; Brennan, 2008, citados por Choque, 2009).

### **2.5.1. INTERÉS DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN PARA LA TECNOLOGÍA ALIMENTARIA**

Según Nogueira (1990), el conocimiento de las isotermas de sorción de agua es uno de los medios más apropiados para 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 útil de productos deshidratados acondicionados en embalajes permeables y las condiciones de equilibrio después de la mezcla de productos con distintas actividades de agua.

Las isotermas proporcionan información para el establecimiento de relaciones termodinámicas, las cuales permiten una interpretación teórica de los resultados experimentales. 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.

### **2.5.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN**

Tóth (2001), citado por Choque (2009) muestra cinco tipos de comportamiento de isotermas de adsorción (Figura 4). Shafiur (2003), citado por Choque (2009), nos dice que si los alimentos contienen compuestos cristalinos hidrosolubles como azúcares o sales, la

isoterma es cóncava del Tipo III, la mayoría de los restantes alimentos tienen isothermas sigmoideas del Tipo II, el punto de inflexión de la isoterma (Tipo II) indica el cambio de la capacidad de ligar agua o a las cantidades relativas de agua unida y libre. El Tipo I es indicativo de un sólido poroso no hinchable, tal como los silicatos antiaglomerantes “anticracking”.

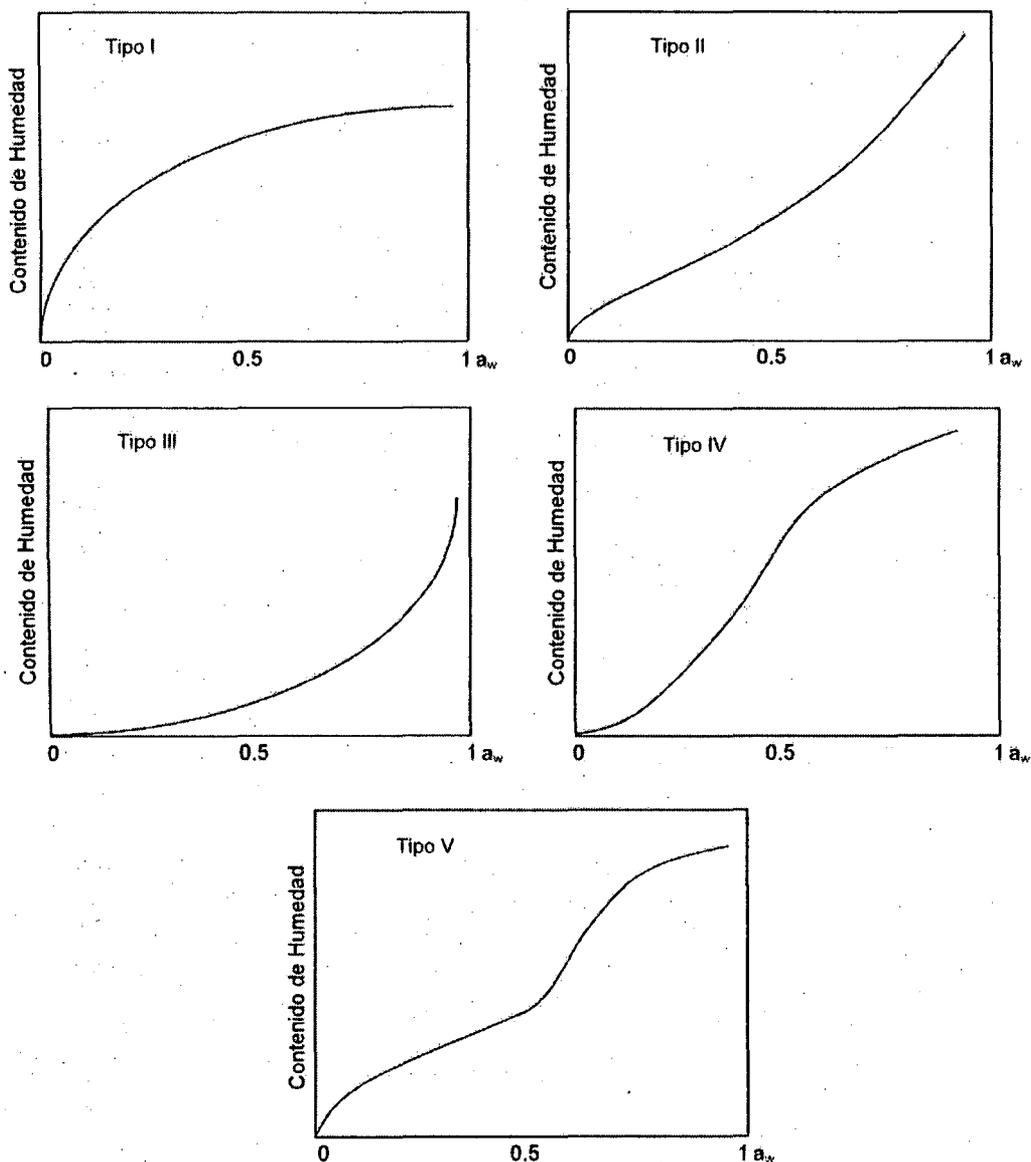


Figura 4. Los cinco tipos de isothermas de adsorción de Van der Waals.

Fuente: Shafiur (2003), citado por Choque (2009).

### 2.5.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LAS ISOTERMAS

El efecto de la temperatura es de gran importancia debido a que los alimentos no son mezclas ideales y la actividad de agua cambia con la temperatura. La temperatura afecta la movilidad de las moléculas de agua y el equilibrio entre las fases de vapor y absorbente. Un aumento de la temperatura, para actividad de agua constante, provoca descenso de la cantidad de agua adsorbida. Una excepción a esto se presenta en el caso de ciertos azúcares constituyentes alimentarios de baja masa molecular que se disuelven en agua y se vuelven más higroscópicos a temperaturas más altas. Por otra parte, la reactividad química y microbiológica se ve afectada por la relación temperatura-contenido de humedad, ya que un aumento de la temperatura provoca aun aumento de la actividad de agua a un contenido de humedad constante (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000).

Badui (1999), indica que el valor de la  $a_w$  se incrementa cuando se eleva la temperatura, ya que igualmente lo hace la presión de vapor; esto se observa en la Figura 5 que muestra la tendencia de la mayoría de los alimentos.

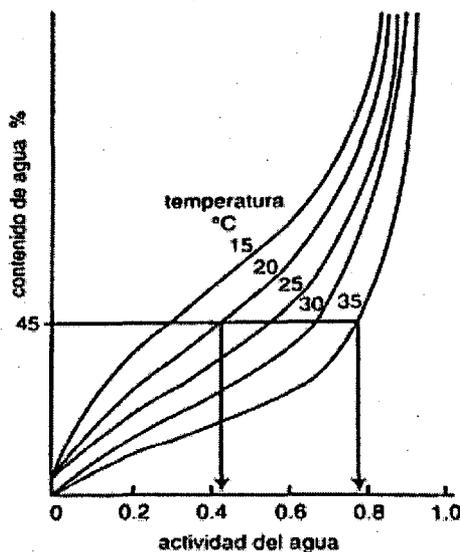


Figura 5. Influencia de la temperatura en las isotermas de adsorción.

Fuente: Badui (1999)

#### 2.5.4. MODELOS MATEMÁTICOS PARA LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN

Para describir las isotermas de sorción de los alimentos existen multitud de ecuaciones matemáticas de carácter teórico, semiempírico y empírico que modelan las curvas de sorción (Clemente, 2003). Los modelos teóricos procuran explicar interacciones existentes entre el agua y la estructura del alimento, lo que lleva a un mejor conocimiento de este último. Las ecuaciones empíricas corresponden a la gran mayoría de las ecuaciones utilizadas para el ajuste y en virtud a su naturaleza no permiten que se llegue a una buena comprensión del alimento (Moura y Germer, 1997, citado por Araujo, 2001).

A pesar de que un gran número de ecuaciones teóricas, semiteóricas y empíricas, vienen siendo propuestas para el cálculo de la humedad de equilibrio, ninguna ecuación teórica es capaz de prever exactamente la humedad de equilibrio de productos agrícolas en un amplio rango de temperatura y actividad de agua (humedad relativa) (Brooker *et al.*, 1974, citado por Nascimento, 2006).

Las ecuaciones utilizadas en el presente trabajo para describir el comportamiento de las curvas de adsorción de humedad de las muestras secas de ají, son mostradas a continuación.

##### 2.5.4.1. Modelo de BET (Brunauer, Emmet y Teller)

El modelo de BET es el más utilizado y proporciona un buen ajuste para una variedad de alimentos sobre una región de actividad de agua entre 0.05 y 0.45, siendo expresado de la siguiente forma (Rizvi, 1986, citado por Gabas, 1998):

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

Donde:

$X_e$  = Humedad de equilibrio (g agua/g m.s.).

$X_m$  = Humedad de la monocapa (g agua/g m.s.).

$a_w$  = Actividad de agua.

$C_{BET}$  = Constante de BET relacionada al calor de sorción.

#### 2.5.4.2. Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)

El modelo de GAB es una ecuación de tres parámetros, utilizado para ajustar los datos de sorción de productos alimenticios hasta actividades de agua de 0.9 (Lima, 2006). Este modelo es de amplio uso en alimentos y es recomendado por el proyecto Europeo COST 90, que trata sobre propiedades físicas en alimentos. Esta ecuación está basada en la teoría de adsorción de BET, la cual da una explicación física a los parámetros involucrados en ella (Kiranoudis *et al.*, 1993; Wolf *et al.*, 1984, citado por Vega *et al.*, 2006).

Lomauro *et al.* (1985), citado por Lima (2006), verificaron que el modelo de GAB puede representar más del 50% de las isotermas de frutas, vegetales y carnes, en comparación con ecuaciones de dos parámetros.

El modelo de GAB se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$X_e = \frac{X_m C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - (1 - C_{GAB}) K_{GAB} a_w)} \quad (3)$$

Donde:

$X_m$  = Humedad en la monocapa (g agua/g m.s.)

$C_{GAB}$  = Constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa.

$K_{GAB}$  = Es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

Las constantes  $C_{GAB}$  y  $K_{GAB}$  están relacionadas con las interacciones energéticas entre las moléculas de la humedad de la monocapa ( $X_m$ ) y las subsiguientes, en un determinado sitio de sorción (Sulamytha, 2009). La constante  $K_{GAB}$  es la tercera constante de la ecuación de GAB, la cual mide la diferencia del potencial químico estándar entre las moléculas de la segunda etapa y aquellas del estado líquido puro; si  $K_{GAB}$  es menor a la unidad, se estimará una sorción menor a la predicha por BET (Zug, 2002a). La constante  $C_{GAB}$  se refiere a las interacciones entre los sitios activos del producto y las moléculas de agua (Sulamytha, 2009).

#### 2.5.4.3. Modelo de Halsey

Halsey (1985), citado por Lima (2006), desarrollo un modelo matemático que considera la condensación de las multicapas a una distancia relativamente grande de la superficie, asumiendo que la magnitud del parámetro B caracteriza el tipo 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, las fuerzas de atracción predominantes son de Van der Waals y capaces de llegar a grandes distancias de la superficie. La ecuación está dada de la siguiente forma:

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

Siendo A, B constantes que dependen de la temperatura y naturaleza del producto.

Así mismo, el modelo de Halsey es utilizado para analizar isotermas 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 (Heldman y Lund, 2007, citados por Choque, 2009).

#### 2.5.4.4. Modelo de Oswin

Este modelo de Oswin es una ecuación empírica, basado en la expansión de una serie matemática para curvas sigmoidales, se ajusta muy bien entre valores de actividad de agua de  $0.0 < a_w < 1.0$  (Lomauro *et al.*, 1985, citado por Feitosa 1998; Pedroso, 1997). Según Lomauro *et al.* (1985), citado por Araujo (2001), la ecuación de Oswin ajusta cerca del 57% de las isotermas de alimentos. Los parámetros característicos A y B del modelo de Oswin muestran relación con la temperatura para diferentes isotermas (Choque, 2009)

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

#### 2.5.4.5. Modelo de Chung-Pfost

Assis *et al.* (1999), citado por Choque (2009), muestra el modelo propuesto por Chung-Pfost que permite estimar con determinada precisión los valores de humedad de equilibrio de granos y cereales para los rangos de 20 a 90% de humedad relativa, en función de la temperatura.

$$a_w = \exp \left[ \frac{A}{RT} \exp(-B X_e) \right] \quad (6)$$

Donde A y B son constantes características del modelo, que dependen de la naturaleza del producto.

#### 2.5.4.6. 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)

$$1 - a_w = \exp(-k X_e^n) \quad (7)$$

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

### 2.5.5. CALIDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Los criterios utilizados para determinar el mejor ajuste de los modelos a los datos experimentales son: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el desvío porcentual medio (P), el error estándar de humedad (SEM) y la verificación del comportamiento de la distribución de los residuos, los cuales son parámetros estadísticos ampliamente utilizados por diversos autores en la determinación de isothermas de alimentos (Henaó, *et al.*, 2009; Duarte, 2008; Iguedjtal *et al.*, 2007; Resende *et al.*, 2006; Arslan y Togrul, 2006; Siripatrawan y Jantawat, 2006; Corrêa *et al.*, 2005; Araujo, 2001; Yu *et al.*, 1999).

El cálculo del desvío porcentual medio (P) y el error estándar de humedad (SEM) se realizan mediante las ecuaciones 8 y 9 respectivamente.

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{ei} - X_{ci}}{X_{ei}} \right| \quad (8)$$

$$SEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{ei} - X_{ci})^2}{N - n}} \quad (9)$$

Donde:

$X_{ei}$  = Contenido de humedad de equilibrio experimental (g agua/g m.s.).

$X_{ci}$  = Contenido de humedad de equilibrio calculada a partir de cada modelo (g agua/g m.s.).

N = Número de puntos experimentales.

n = Número de constantes en el modelo.

Wang y Brennan (1991), citado por Fadini *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 presenten 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.

#### 2.5.6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN

Gal (1975), citado por Feitosa (1998), al revisar la literatura hizo una clasificación de las técnicas para la medición de las isotermas de sorción de toda clase de materiales sólidos (Tabla 2). Las isotermas de sorción pueden ser determinadas de acuerdo a dos principios básicos: el gravimétrico y el manométrico o higrométrico. Así mismo, la adición de un tercer grupo suplementario se hace necesario para acomodar métodos especiales aplicables bajo condiciones extremas (alta actividad de agua), los cuales usualmente no se ajustan con la clasificación de los otros dos grupos.

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.

Tabla 2. **Métodos para la determinación de las isotermas de sorción.**

<b>1. Métodos gravimétricos</b>
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
<b>2. Métodos manométricos o higrométricos</b>
2.1. Métodos manométricos
2.2. Métodos higrométricos
<b>3. Métodos especiales</b>

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

## 2.6. CALOR ISOSTÉRICO DE SORCIÓN

El calor isostérico es un parámetro de mucha utilidad en los procesos de adsorción y desorción de agua en alimentos (Vega *et al.*, 2006). Según Wang y Brennan (1991), citado por Duarte (2008) indican que el calor de adsorción es una medida de la energía liberada en la sorción de agua por el producto, mientras que el calor de desorción representa el requerimiento de energía necesaria para romper las fuerzas intermoleculares entre las moléculas de vapor de agua y la superficie adsorbente. Así, el calor de sorción es considerado

un indicador de las fuerzas intermoleculares de atracción entre los locales de sorción y el vapor de agua.

El calor isostérico neto de sorción ( $q_{st}$ ) se define como el calor total de sorción de agua del alimento ( $Q_{st}$ ) menos el calor de vaporización de agua pura ( $\lambda$ ), a una determinada temperatura. Un método largamente utilizado para calcular el calor isostérico de sorción, sea para el proceso de adsorción o para el de desorción, esta dado por la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ecuación 10) (Telis-Romero *et al.*, 2005) mostarda a continuación:

$$\left. \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial(1/T)} \right|_x = -\frac{Q_{st} - \lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (10)$$

Donde:

- $q_{st}$  = Calor isostérico neto de sorción (kJ/mol).
- $Q_{st}$  = Calor isostérico total de sorción (kJ/mol).
- $\lambda$  = Calor de vaporización del agua pura (kJ/mol).
- $R$  = Constante universal de los gases,  $8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Integrando la ecuación y asumiendo que el calor isostérico líquido de sorción es independiente de la temperatura, se tiene la siguiente expresión:

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} \Big|_x = \frac{q_{st}}{R} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (11)$$

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.

Experimentalmente, para evaluar y obtener el valor de ( $q_{st}$ ) las isothermas de adsorción se deben evaluar a diferentes temperaturas, graficando  $\ln(a_w)$  vs.  $1/T$ , a sus respectivas humedades (Figura 6), siendo la pendiente  $-q_{st}/R$  (Heldman y Lund, 2007, citado por Choque, 2009).

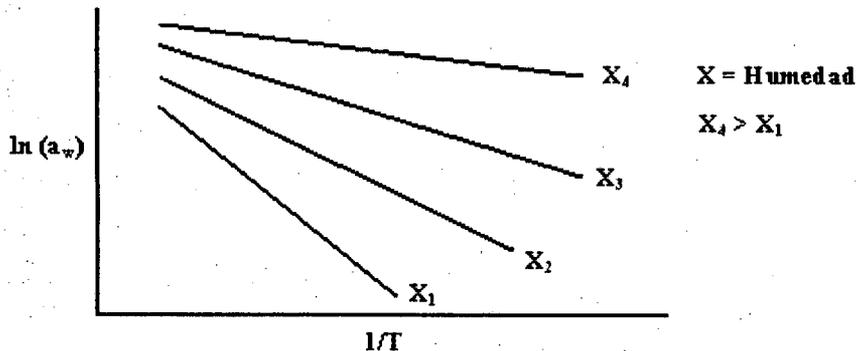


Figura 6. Relación de Clausius-Clapeyron para distintos contenidos de humedad.

Fuente: Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado (2000).

Para Tsami *et al.* (1990), el conocimiento de la dependencia del calor de sorción del agua en función del contenido de humedad es esencial en el estudio de varios procesos alimentarios, pudiendo ser usado para estimar las necesidades energéticas del proceso de secado, además de proporcionar datos importantes sobre el estado del agua en los productos alimenticios. Es así que Tsami *et al.* (1990) utilizan la siguiente relación exponencial empírica entre el calor de sorción y el contenido de humedad para frutas secas, propuesta de la siguiente forma:

$$q_{st} = q_0 \exp(-X_e/X_0) \quad (12)$$

Donde:

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

- $X_e$  = Contenido de humedad de equilibrio (g agua/g m.s.).  
 $X_0$  = Contenido de humedad inicial del material alimenticio (g agua/g m.s.).

## 2.7. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

Una de las más importantes características 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 distribuida 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 (Tóth, 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 puentes de hidrógeno o fuerzas de Van der Waals, y en algunos casos ocurriendo reacciones (Vega *et al.*, 2006).

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

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (13)$$

Donde:

D es la constante 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 la temperatura absoluta (°K).

La dependencia con la temperatura de las constantes fisicoquímicas más importantes ( $X_m$ ,  $C_{GAB}$ ,  $K_{GAB}$ ) de la isoterma de GAB, se pueden evaluar con la ecuación de Arrhenius (Ecuación 13); obteniendo de esta forma la energía de activación ( $E_a$ ), que representa la energía necesaria para unir o romper la primera monocapa de agua entre el sistema solido-agua, donde la formación del enlace solido-agua (adsorción) requiere de mayor energía que romper tal unión (desorción) (Vega *et al.*, 2006).

## 2.8. ALMACENAMIENTO

Las frutas, hortalizas, tubérculos, raíces 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 perecer y con ello perder la calidad y su valor comercial (Ospina y Aldana, 1995, citado por Choque, 2009).

La buena conservación pasa por un almacenamiento al abrigo de la humedad, del oxígeno del aire y de la luz, que afecta a los pigmentos y cataliza las oxidaciones (Casp, 2003, citado por Choque, 2009). El deterioro de los alimentos se ve influido por una serie de factores ambientales, entre ellos la temperatura tanto alta como baja, que asociados a los otros factores causan la degradación de los alimentos en un determinado tiempo. Las influencias destructoras serán mayores, mientras mayor sea en tiempo de exposición del alimento a los factores de degradación (Casp, 2003, citado por Choque, 2009).

## **2.8.1. FACTORES QUE ALTERAN LOS ALIMENTOS ALMACENADOS**

Para garantizar una buena preservación de los productos agrícolas hay que tener en cuenta que estos son seres vivos y que en ellos ocurren procesos fisiológicos, como el proceso respiratorio, en los cuales las moléculas al ser oxidadas por el oxígeno producen 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 atmósfera (Brennan, 1980).

### **2.8.1.1. TEMPERATURA**

Independientemente de su efecto sobre los microorganismos, el frío y el calor no controlados pueden causar deterioro de los alimentos (Ospina y Aldana, 1995, citado por Choque, 2009).

El ritmo de las reacciones bioquímicas es función de la temperatura, de forma que a temperaturas de almacenamiento más bajas, la alteración de los alimentos debida a daños de origen bioquímico se ralentiza, a la vez que disminuye el crecimiento de bacterias y mohos (Brennan, 2008, citado por Choque, 2009).

Según Cheftel y Cheftel (2000) cada especie bacteriana prolifera únicamente entre ciertos límites de temperatura y tiene para su desarrollo, una temperatura óptima. Por eso la temperatura de almacenamiento va a tener una influencia considerable sobre la alteración que pueda padecer un alimento.

En general, teniendo en cuenta la temperatura a la cual proliferan, se distinguen tres grupos de microorganismos que afectan a los alimentos, la cual se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Tolerancia a la temperatura de los microorganismos.

Microorganismos	Temperatura de desarrollo °C		
	Mínima	Óptima	Máxima
Psicrófilos	-15	+10	+20 aprox.
Mesófilos	+5 a +10	+30 a +40	+50 aprox.
Termófilos	+40	+50 a +55	+65

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

En cada grupo se encuentran especies para las cuales el carácter termófilo, mesófilo o psicrófilo es estricto y otras para los que es facultativo; asimismo los límites de temperatura son más o menos amplios; ciertos *Streptococcus* se desarrollan entre 0 y 30°C.

Estos datos son suficientes, para confirmar que las posibles alteraciones bacterianas que pudieran presentarse van a variar según la temperatura de almacenamiento.

### 2.8.1.2. HUMEDAD RELATIVA

Si la humedad del ambiente de almacenamiento excede la humedad relativa de equilibrio (HRE) del alimento, este aumentará su humedad y viceversa. 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 cáscaras de los cereales o de las pieles de las frutas y hortalizas (**Brennan, 2008**, citado por **Choque, 2009**).

La humedad ambiente interviene sobre todo en la proliferación de microorganismos en la superficie de los productos alimenticios; pero no hay que olvidarse que varía en función de la temperatura y que por otra parte hay tendencia a establecerse un equilibrio entre la humedad relativa del ambiente y la actividad de agua del producto. Es por tanto un factor que no puede considerarse independientemente de los otros (**Cheftel y Cheftel, 2000**). En el caso ideal, la

humedad de almacenamiento debería ser igual a la humedad de equilibrio del alimento (Brennan, 2008, citado por Choque, 2009).

### **2.8.1.3. ATMÓSFERA AMBIENTE**

Además del vapor de agua, también intervienen otros gases de la atmósfera, tales como el oxígeno, nitrógeno y anhídrido carbónico, los cuales afectan a la flora bacteriana susceptible de alterar un alimento; la presión parcial del oxígeno influye sobre el potencial de oxidación-reducción que tiene un alimento; sin embargo, el que más interviene sobre la flora de alteración es el potencial del alimento, porque, por lo general, resulta poco afectado por las variaciones moderadas de la presión de oxígeno (Cheftel y Cheftel, 2000).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El trabajo de investigación, se desarrolló en el Laboratorio de Procesos Agroindustriales, de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial – Facultad de Ingeniería y en Laboratorio de Química, ambos pertenecientes a la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – Puerto Maldonado, durante los meses de Enero a Marzo del 2011. Así mismo, la última parte de la investigación fue llevada a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Carrera Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – Cusco, durante los meses de Marzo a Abril del 2011.

#### 3.2. MATERIALES

##### 3.2.1. Materia prima

El material utilizado en la presente investigación fue el ají (*Capsicum annum* L.) conocido popularmente en la región con el nombre de ají “ojito de pescado”. El material de estudio fue cosechado del predio perteneciente a la Familia Quispe, ubicado en la Comunidad de la Cachuela Km 4, provincia de Tambopata - Madre de Dios. El ají en el momento de su cosecha se encontraba en su estado de maduración completa, el cual es denotado por su característico color rojo y con un peso medio de  $0.4216 \pm 0.04$  g. En el intervalo entre la cosecha y el acondicionamiento de las muestras, el ají fue almacenado en una cámara frigorífica a 7°C.

##### 3.2.2. Reactivos (Sales)

- Cloruro de Litio (LiCl), marca: Scharlau Chemie S.A.
- Acetato de Potasio ( $KC_2H_3O_2$ ), marca: Productos Químicos. Monterrey, S.A.

- Cloruro de Magnesio ( $MgCl_2$ ), marca: Scharlau Chemie S.A.
- Carbonato de Potasio ( $K_2CO_3$ ), marca: Ciencia y Técnica S.R.L.
- Nitrato de Magnesio ( $MgNO_3$ ), marca: Scharlau Chemie S.A.
- Nitrato de Sodio ( $NaNO_2$ ), marca: HiMedia Laboratories, S.A.
- Cloruro de Sodio ( $NaCl$ ), marca: Scharlau Chemie S.A.
- Cloruro de Potasio ( $KCl$ ), marca: Scharlau Chemie S.A.

### 3.2.3. Equipos de laboratorio

- Estufa, marca TOMOS, modelo ODHG-9053A. T°: 0-200°C. precisión  $\pm 1^\circ C$ .
- Estufa, marca MEMMERT, modelo UNE-400, precisión  $\pm 0.5^\circ C$ .
- Incubadora, marca MEMMERT, modelo INB-400, T°: 0-70°C.
- Balanza analítica, marca AND, modelo HR-200, rango: 0-210 g., precisión:  $\pm 0.0001$  g.
- Balanza analítica, marca OHAUS ADVENTURER, modelo AR 2140, rango: 0-210 g., precisión:  $\pm 0.0001$  g.
- Balanza de precisión, marca GEHAK, rango: 0.2 g – 6100 g. precisión  $\pm 0.1$  g.
- Cámara digital, marca PANASONIC, modelo LUMIX DMC-LS80.

### 3.2.4. Materiales

- Frascos de vidrio.
- Placas petri, marca KIMBLE USA.
- Recipientes de plástico (Taper) de 680 ml, marca M&R.
- Termómetro de mercurio (rango: 0-100°C).
- Probeta de  $100 \pm 1$  ml., marca: GIARDINO Italy.
- Piceta con agua destilada.
- Bandejas de malla metálica.
- Pinzas.
- Espátulas.

- Jeringa descartable de 5 ml.
- Guantes quirúrgicos.
- Mascarillas.
- Bolsas de polietileno.
- Campana desecadora.
- Lentes de seguridad, marca KAMASA.
- Cinta aislante, marca 3M.

### **3.2.5. Soluciones químicas de desinfección**

- Hipoclorito de sodio al 7.5%.
- Alcohol etílico de 96°, Laboratorios LA COPPER S.A.C.
- Formol al 40%, Laboratorios LA COPPER S.A.C.

## **3.3. MÉTODOLÓGÍA**

### **3.3.1. Caracterización de la materia prima**

El análisis fisicoquímico de las muestras secas de ají, fue realizado en Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco - UNSAAC. Los análisis realizados y sus respectivas normas de determinación son mostrados en la Tabla 4.

**Tabla 4. Tipos de análisis fisicoquímicos realizados en el Aji seco y sus respectivas normas de determinación.**

<b>Análisis</b>	<b>Norma</b>
Humedad %	NTP 206.011
Proteína %	AOAC 935.39C
Grasa %	NTP 206.017
Ceniza %	AOAC 935.39B
Fibra %	FAO 14/7
Carbohidratos %	Diferencia
Energía (Kcal/100)	Calculado
Acidez % (Ac. Cítrico)	NTP 206.013

**Fuente: Laboratorio de Análisis Químico de la UNSAAC (2011).**

### **3.3.2. Acondicionamiento de las muestras**

Consistió en el secado de las muestras de ají, el cual se realizó en una estufa (marca TOMOS, modelo ODHG-9053A) con circulación de aire, a una temperatura de 60°C durante 24 horas. En la Figura 7, se muestra el diagrama de operaciones realizado para el acondicionamiento de la muestra de ají.

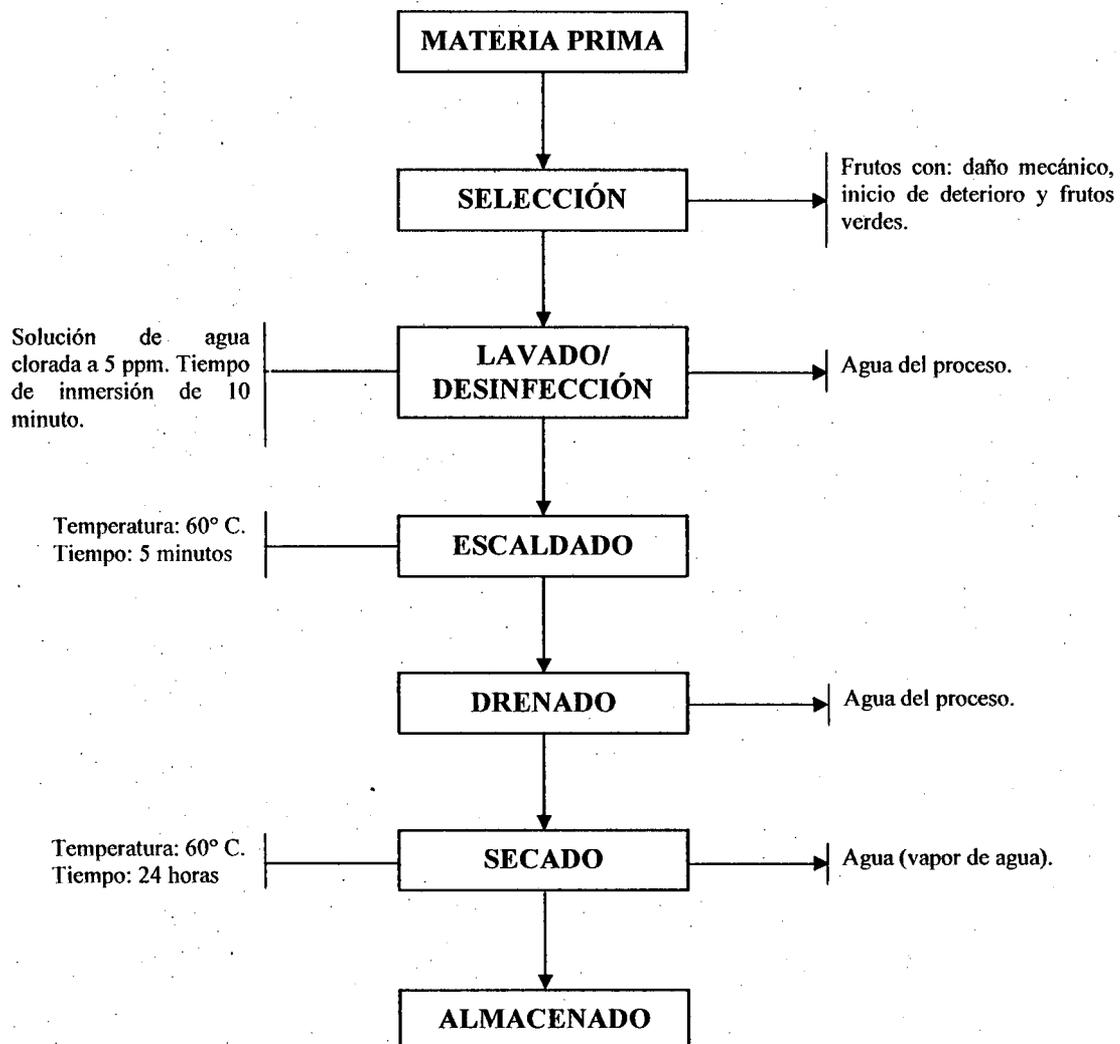


Figura 7. Diagrama de operaciones para el secado del ají (*Capsicum annuum* L.).  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Abajo se muestra la descripción detallada de los procedimientos que fueron realizados para obtener las muestras secas de ají.

### 3.3.2.1. Selección

La selección consistió en eliminar aquellos frutos que no presentaron cualidades apropiadas para el procesamiento, tales como frutos con daño mecánico, inicio de deterioro y

frutos verdes. Es así que sólo se procesaron frutos sanos y maduros (denotados por un color rojo característico).

#### **3.3.2.2. Lavado/desinfección**

El lavado se llevó a cabo en forma manual, con agua potable, con el fin de eliminar residuos de tierra o cualquier partícula de suciedad adherida a la muestra; luego se procedió a su desinfección por inmersión en agua clorada a 5 ppm durante 10 minutos.

#### **3.3.2.3. Escaldado**

El escaldado se realizó con el fin de inactivar enzimas como la lipoxiganasa, la polifenoloxidasa, la poligalacturonasa y la clorofenolasa, las cuales causan pérdidas en las propiedades de calidad como color, sabor, textura y valor nutricional de las frutas y hortalizas. Para el escaldado, las muestras de ají fueron sumergidas en agua a 60°C durante 5 minutos, tal como lo recomienda Cardona *et al.* (2006), luego del cual se sumergieron inmediatamente en agua fría a fin de evitar que se sigan cocinando.

#### **3.3.2.4. Drenado**

Consistió en el escurrido de las muestras de ají luego de su escaldado, para lo cual se hizo uso de un colador de acero inoxidable.

#### **3.3.2.5. Secado**

La operación de secado se realizó con el fin de remover el agua contenida en las muestras de ají, lo cual minimiza el crecimiento de microorganismos y reacciones de deterioro químico. El secado se llevó a cabo 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.

### 3.3.2.6. Almacenado

Las muestras secas de ají, fueron almacenadas en frascos de vidrio herméticamente cerradas y cubiertas con papel aluminio, posteriormente colocadas en un ambiente fresco, seco y al resguardo de la luz hasta su utilización en la determinación de las isothermas de adsorción.

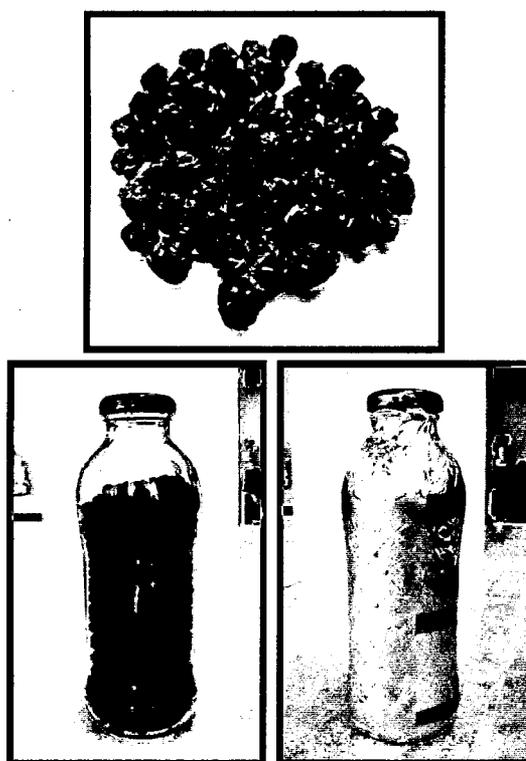


Figura 8. Muestras secas de ají almacenadas en envases de vidrio cubierto con papel aluminio.

Fuente: Elaboración propia (2011).

### 3.3.3. Isotermas de adsorción

La construcción de las isotermas de adsorción, se basó en el método estático gravimétrico o método de control continuo de cambios de peso, descrito por Jowitt *et al.* (1983), citado por Gabas (1998).

Las humedades relativas fueron obtenidas con soluciones salinas saturadas que cubren un rango de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0.11 a 0.85, que pueden ser calculadas a través de las ecuaciones de regresión, determinadas por Labuza *et al.* (1985), citado por Pedroso (1997). Las sales utilizadas con sus respectivas actividades de agua (humedades relativas) y las ecuaciones de regresión son mostrados en las Tablas 5 y 6 respectivamente.

Tabla 5. Variación de las humedades relativas de equilibrio (%) en función de las tres temperaturas utilizadas en el experimento.

Nomenclatura	Sal	Humedad relativa (%)		
		25°C	35°C	40°C
Cloruro de Litio	(LiCl)	11.42	10.81	10.54
Acetato de Potasio	(KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> )	23.67	21.55	20.61
Cloruro de Magnesio	(MgCl <sub>2</sub> )	32.87	31.80	31.31
Carbonato de Potasio	(K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	44.32	43.63	43.30
Nitrato de Magnesio	(MgNO <sub>3</sub> )	53.58	51.54	50.60
Nitrato de Sodio	(NaNO <sub>2</sub> )	65.85	62.80	61.40
Cloruro de Sodio	(NaCl)	76.17	74.30	73.42
Cloruro de Potasio	(KCl)	85.46	82.11	80.56

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

Tabla 6. Sales y ecuaciones utilizadas para obtener la  $a_w$  o humedad relativa (%) a una temperatura (°K) determinada.

Nomenclatura	Sal	Ecuación de regresión	$r^2$
Cloruro de Litio	(LiCl)	$\ln a_w = (500.95 \ 1/T) - 3.85$	0.976
Acetato de Potasio	( $KC_2H_3O_2$ )	$\ln a_w = (861.39 \ 1/T) - 4.33$	0.965
Cloruro de Magnesio	( $MgCl_2$ )	$\ln a_w = (303.35 \ 1/T) - 2.13$	0.995
Carbonato de Potasio	( $K_2CO_3$ )	$\ln a_w = (145.00 \ 1/T) - 1.30$	0.967
Nitrato de Magnesio	( $MgNO_3$ )	$\ln a_w = (356.60 \ 1/T) - 1.82$	0.987
Nitrato de Sodio	( $NaNO_2$ )	$\ln a_w = (435.96 \ 1/T) - 1.88$	0.974
Cloruro de Sodio	(NaCl)	$\ln a_w = (228.92 \ 1/T) - 1.04$	0.961
Cloruro de Potasio	(KCl)	$\ln a_w = (367.58 \ 1/T) - 1.39$	0.967

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

Las isotermas de adsorción fueron determinadas a las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°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 plástico fueron limpiados con una solución de formol al 40%, a fin de evitar posibles 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 7.

**Tabla 7. 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 <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> )	200	65
Cloruro de Magnesio	(MgCl <sub>2</sub> )	200	25
Carbonato de Potasio	(K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	200	90
Nitrato de Magnesio	(MgNO <sub>3</sub> )	200	50
Nitrato de Sodio	(NaNO <sub>2</sub> )	200	30
Cloruro de Sodio	(NaCl)	200	60
Cloruro de Potasio	(KCl)	200	80

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

Posteriormente 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 triplicado muestras de cerca de 1 g de ají en las placas petri, para luego ser introducidas en los frascos de vidrio los cuales se cerraron herméticamente y se colocaron en una incubadora (marca MEMMERT, modelo INB-400) a las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente.

Las muestras fueron pesadas periódicamente cada 24 horas en una balanza analítica (Marca AND, modelo HR-200, de precisión  $\pm 0.0001$  g y Marca OHAUS ADVENTURER, modelo AR 2140, de precisión  $\pm 0.0001$  g) hasta que presenten un peso constante, momento

en el cual alcanzan el equilibrio con su ambiente, que se considera cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas fuese igual o inferior a 0.001 g tal como lo recomienda **Gabas *et al.* (2009)**.

### 3.3.4. Determinación de la humedad de equilibrio ( $X_e$ )

La humedad de equilibrio fue determinada por la diferencia entre la masa de la muestra en equilibrio y su masa seca, tal como lo describe **Fiorentin *et al.* (2010)** mediante la siguiente ecuación.

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (14)$$

Donde:

$X_e$  = Humedad de equilibrio. (g agua/g m.s.)

$m_{eq}$  = Masa de la muestra en el equilibrio (g).

$m_s$  = Masa de la muestra seca (g).

La masa seca fue determinada en una estufa a 105°C durante 24 horas (**AOAC, 1990**). Los cálculos de los valores de humedad de equilibrio fueron realizados para cada una de las placas petri, obteniéndose por último la media aritmética de las tres repeticiones para cada solución salina saturada.

### 3.3.5. Ajuste matemático de las isotermas de adsorción

Los datos experimentales de la humedad de equilibrio fueron ajustados a los modelos matemáticos de BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost y Henderson (Ecuaciones 2, 3, 4, 5, 6 y 7 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 5.0, a través del análisis de regresión no lineal estimado por el método 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 criterios utilizados para evaluar la calidad de ajuste de los modelos de isothermas a los datos experimentales fueron, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el desvío porcentual medio (P) (Ecuación 8), el error estándar de humedad (SEM) (Ecuación 9) y la verificación del comportamiento de la distribución de los residuos.

### **3.3.6. Determinación de la monocapa del modelo de GAB**

La monocapa  $X_m$ , se determinó una vez ajustada la isoterma de GAB (Ecuación 3), para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C, la determinación fue realizada a través de una regresión no lineal, utilizando el software estadístico STATISTICA para Windows versión 5.0.

### **3.3.7. Determinación del calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ )**

A partir de las isothermas de adsorción construidas para el ají seco y ajustadas por el modelo de Halsey, se determinó el calor isostérico de adsorción en función de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) del ají seco. La finalidad de este estudio fue analizar los parámetros energéticos en la adsorción de agua por la materia prima, el cual provee una información importante acerca del mecanismo de adsorción e interacción entre los componentes del producto y el agua. El calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) fue calculado a través de la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ecuación 10).

Para un intervalo de humedad de equilibrio ( $X_e$ ) 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 de la temperatura en grados Kelvin,  $1/T$ , fue realizada a diferentes humedades (0.06 a 0.32 g agua/g m.s.), donde el valor del  $q_{st}$  correspondió al coeficiente angular de cada recta, multiplicada por la constante universal de los gases  $R$  ( $8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). 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 5.0, calculándose los parámetros  $q_0$  y  $X_0$  para el ají seco.

### 3.3.8. Determinación de la energía de activación ( $E_a$ )

La energía de activación fue determinada a través de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 13), 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 coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

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

En la Figura 9 se muestra el diagrama de flujo seguido en este trabajo, para la determinación de las isotermas de adsorción del ají seco.

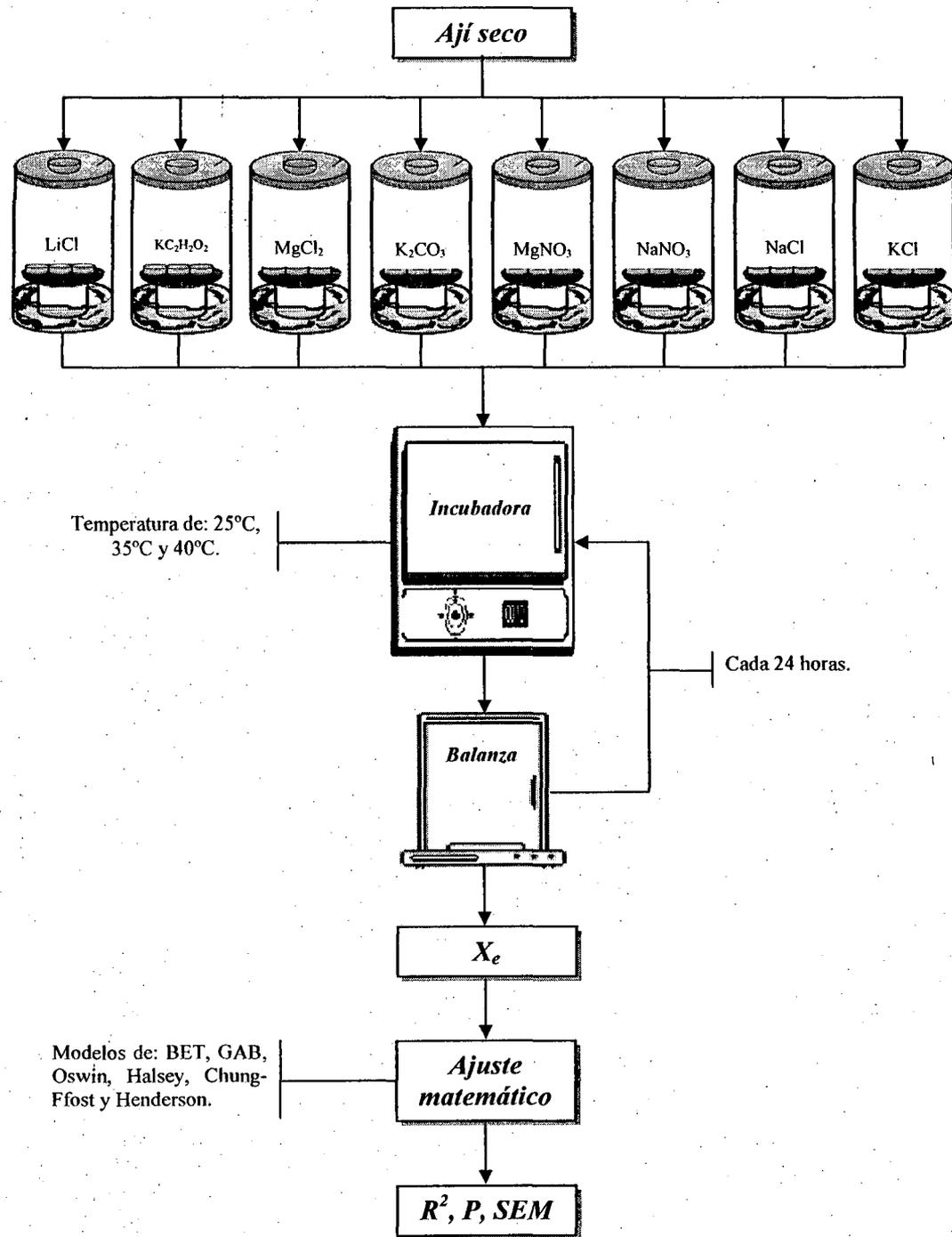


Figura 9. Diagrama de flujo para la determinación de las isothermas de adsorción del aji seco.

Fuente: Elaboración propia (2011).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

Los resultados de la composición fisicoquímica del ají seco son presentados en la Tabla 8, siendo los resultados presentados en ella el resultado de la media aritmética de tres repeticiones.

Tabla 8. Composición fisicoquímica del ají seco (*Capsicum annum L.*).

ANÁLISIS	VALOR <sup>a</sup>
Humedad (%)	3.99 ± 0.17
Proteína (%)	12.63 ± 0.62
Grasa (%)	7.63 ± 0.09
Ceniza (%)	5.32 ± 0.29
Fibra (%)	24.30 ± 0.46
Carbohidratos (%)	70.42 ± 0.42
Energía (kcal/100)	346.13 ± 1.59
Acidez (% Ac. Cítrico)	0.18 ± 0.01

a: promedio de tres replicas.

± : desviación estándar.

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico de la UNSAAC (2011)

En la Tabla 8 se puede apreciar que el ají seco (*Capsicum annum L.*) es un producto con bajo contenido de humedad y elevados valores de proteína y carbohidratos; el porcentaje de estos componentes y los obtenidos para grasa, ceniza, fibra y energía (kcal/100) en el presente trabajo, son mayores a los reportados por Reyes *et al.* (2009) para el ají amarillo seco (Humedad 16.6%, proteína 7.3%, grasa 6.3%, ceniza 5.0%, fibra 23.2% carbohidratos 64.8% y energía 302 kcal) a excepción de la humedad (3.99 ± 0.17 %).

## 4.2. HUMEDAD DE EQUILIBRIO

La humedad inicial de las muestras secas de ají fue de  $5.5749 \pm 0.09$  g agua/g m.s. Los datos experimentales de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en función de la actividad de agua ( $a_w$ ) a las temperaturas de estudio de 25°C, 35°C y 40°C, son mostrados en la Tabla 9. El tiempo requerido para alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en las muestras secas de ají fue de 21, 18 y 15 días para las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C respectivamente.

Tabla 9. Valores de humedad de equilibrio,  $X_e$  (g agua/g m.s.) experimental de las muestras secas de ají en función de la actividad de agua ( $a_w$ ) a las temperaturas de estudio.

Solución Salina	Temperatura					
	25°C		35°C		40°C	
Saturada	$a_w$	$X_e$ (b.s.) <sup>a</sup>	$a_w$	$X_e$ (b.s.) <sup>a</sup>	$a_w$	$X_e$ (b.s.) <sup>a</sup>
LiCl	0.1142	0.0753	0.1081	0.0679	0.1054	0.0594
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.2367	0.0833	0.2155	0.0753	0.2061	0.0674
MgCl <sub>2</sub>	0.3287	0.0936	0.3180	0.0826	0.3131	0.0796
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.4432	0.1119	0.4363	0.1070	0.4330	0.0983
MgNO <sub>3</sub>	0.5358	0.1554	0.5154	0.1408	0.5060	0.1446
NaNO <sub>2</sub>	0.6585	0.2186	0.6280	0.1902	0.6140	0.1754
NaCl	0.7617	0.2249	0.7430	0.2069	0.7342	0.2052
KCl	0.8546	0.3159	0.8211	0.2859	0.8056	0.2907

a: promedio de las tres replicas.

Fuente: **Elaboración propia (2011).**

En la Tabla 9 se observa como la humedad de equilibrio aumenta con la elevación de la actividad de agua ( $a_w$ ), demostrando la higroscopicidad de las muestras, así mismo se puede apreciar que la humedad de equilibrio disminuye con el incremento de la temperatura de 25°C a 40°C, siguiendo la misma tendencia de la mayoría de los productos agrícolas (Saravacos *et al.*, 1986; Tsami *et al.*, 1990; Ferreira y Pena, 2003; Kurozawa *et al.*, 2005; Telis-Romero

*et al.*, 2005; Resende, 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 humedad de equilibrio con el incremento de la temperatura 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 ruptura de la ligación intermolecular entre el agua y los sitios de sorción, reduciendo el contenido de agua del producto. A medida que la temperatura varía, la excitación de las moléculas, así como la distancia y, por consiguiente, la atracción 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.

#### 4.3. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

La representación gráfica de los datos experimentales de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en función de la actividad de agua ( $a_w$ ) para las tres temperaturas de estudio (Tabla 9) puede ser apreciado en la Figura 10; en esta figura se observa que todas las isotermas presentaron un comportamiento del tipo III, de acuerdo con la clasificación de las isotermas de Van der Waals (Shafiur, 2003, citado por Choque, 2009). El tipo III de isotermas es típica de alimentos con alto contenido de carbohidratos y sales (Alakali *et al.*, 2009), dicho enunciado se corrobora ya que el mayor constituyente del ají seco son los carbohidratos, con un  $70.42 \pm 0.42$  % (Tabla 8).

El comportamiento del tipo III de isotermas también fue observado en productos como jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco (Alakali *et al.*, 2009), huasai (*Euterpe oleracea* Mart.) y copoasú (*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 maracuya (*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 10 también puede apreciarse claramente lo antes mencionado, la influencia de la temperatura en las isothermas de adsorción, donde la humedad de equilibrio disminuye con el incremento de la temperatura.

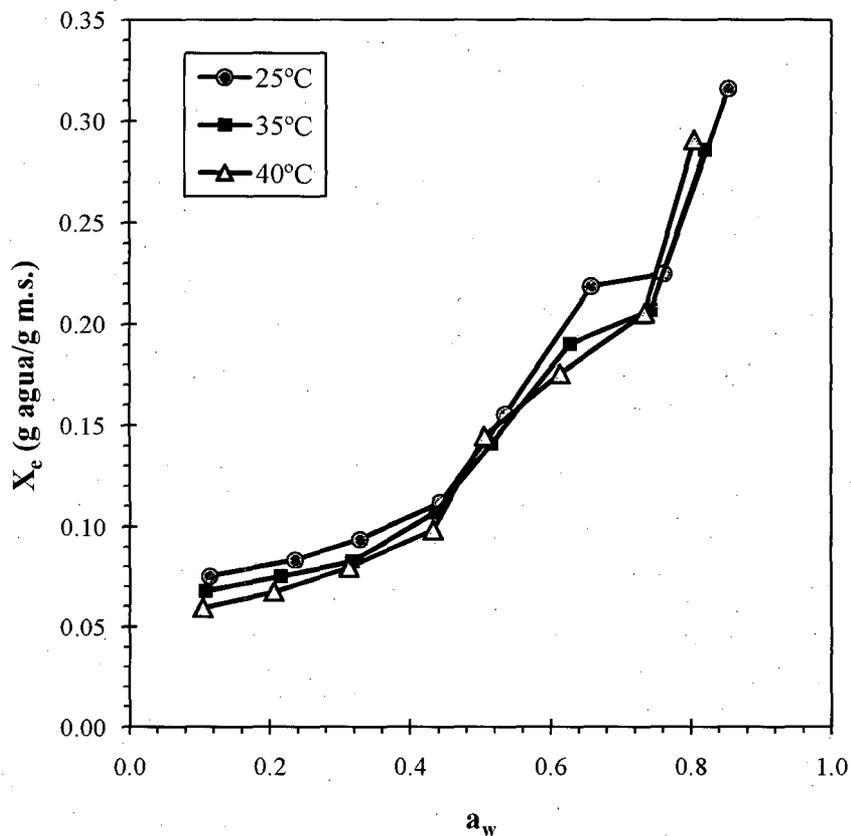


Figura 10. Isothermas de adsorción para el ají seco (*Capsicum annuum* L.) a las temperaturas de estudio.

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la Figura 10 se observa que la humedad presentó un comportamiento lineal hasta una actividad de agua ( $a_w$ ) de aproximadamente 0.5. A partir de este valor, el comportamiento se torno exponencial para todas las temperaturas estudiadas; este comportamiento sugiere que a partir de 0.5 de  $a_w$ , un pequeño incremento en la humedad relativa del ambiente propicia un considerable incremento en la humedad de equilibrio del ají seco, comprometiendo la calidad del producto en los locales de almacenamiento donde la humedad relativa sea mayor a 50%. De esta forma el producto requerirá mayores cuidados cuando sea almacenado a una humedad relativa superior a la antes mencionada. Comportamientos similares fueron observadas en las isotermas de adsorción de harina de pijuayo (*Bactris gasipaes*), huasai (*Euterpe oleracea* Mart.) en polvo y copoasú (*Teobroma grandiforum* Schum.) en polvo, donde fue observado que estos productos requirieron de mayores cuidados al ser manipulados o almacenados en humedades relativas superiores a 50%, 60% y 65% respectivamente (Ferreira y Pena, 2003; Silva *et al.* 2010; Eluan *et al.* 2008).

En las isotermas de adsorción de la Figura 10 también se aprecia un entrecruzamiento de las curvas cercano a una actividad de agua de 0.5, siendo más pronunciado este comportamiento a las temperaturas de 35°C y 40°C. Tsami *et al.*, (1990) reportaron entrecruzamientos para frutas desecadas en un rango de actividad de agua de 0.55 – 0.70, a las temperaturas de 15°C y 45°C. Vega *et al.* (2006) considera que el entrecruzamiento de las curva se debe a un aumento de la actividad enzimática y del movimiento entre moléculas de agua, carbohidratos y proteínas.

#### 4.4. AJUSTE DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Para predecir el comportamiento de adsorción de humedad en el ají seco (Tabla 9), seis modelos ampliamente utilizados en isotermas de alimentos (BET, GAB, Halsey, Oswin, Chung-Pfost y Henderson, ecuaciones 2, 3, 4, 5, 6 y 7 respectivamente) fueron ajustados a los datos experimentales de humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en función 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 (Anexo 2), para el ají seco.

Tabla 10. Parámetros de ajuste de las isotermas de adsorción del ají seco 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 25°C.

MODELO	PARÁMETROS <sup>a</sup>	$R^2$	P (%)	SEM	DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS <sup>c</sup>	
BET <sup>b</sup>	$X_m$	0.0634	0.9750	11.4260	0.0541	TENDENCIOSO
	$C_{BET}$	5361378.29				
GAB	$X_m$	0.0850	0.9676	9.0278	0.0183	ALEATORIO
	$C_{GAB}$	20.4664				
	$K_{GAB}$	0.8601				
HALSEY	A	0.0309	0.9692	9.1529	0.0227	ALEATORIO
	B	1.5563				
OSWIN	A	0.1435	0.9673	9.3182	0.0168	LIGERAMENTE ALEATORIO
	B	0.4419				
CHUNG-PFOST	A	-458.4691	0.9449	13.4584	0.0228	TENDENCIOSO
	B	10.5128				
HENDERSON	$k$	11.8745	0.9487	12.1902	0.0204	TENDENCIOSO
	$n$	1.4905				

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 – 0.44, solo se usaron los primeros cuatro datos.

c: La evaluación de los residuos se realizó a partir de las gráficas de los datos estimados vs. los valores residuales (Anexo2).

Fuente: Elaboración propia (2011).

Tabla 11. Parámetros de ajuste de las isothermas de adsorción del ají seco 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 35°C.

MODELO	PARÁMETROS <sup>a</sup>	$R^2$	P (%)	SEM	DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS <sup>c</sup>
BET <sup>b</sup>	$X_m$ 0.0591	0.9725	8.2492	0.0253	TENDENCIOSO
	$C_{BET}$ 4538674.547				
GAB	$X_m$ 0.0751	0.9729	8.3127	0.0151	ALEATORIO
	$C_{GAB}$ 24.6760				
	$K_{GAB}$ 0.8997				
HALSEY	A 0.0331	0.9721	7.9517	0.0152	ALEATORIO
	B 1.4832				
OSWIN	A 0.1352	0.9700	9.5057	0.0145	TENDENCIOSO
	B 0.4735				
CHUNG-PFOST	A -470.7306	0.9461	14.2412	0.0217	TENDENCIOSO
	B 11.0669				
HENDERSON	$k$ 12.5245	0.9506	12.6872	0.0190	TENDENCIOSO
	$n$ 1.4749				

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 – 0.44, solo se usaron los primeros cuatro datos.

c: La evaluación de los residuos se realizó a partir de las gráficas de los datos estimados vs. los valores residuales (Anexo2).

Fuente: Elaboración propia (2011).

En base a los datos presentados en las Tablas 10, 11 y 12 se observa que los modelos de GAB y Halsey son los que mejor describen el proceso de adsorción de humedad en el ají seco, con valores muy semejantes a las temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C. Los modelos de GAB y Halsey presentan un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9676 y 0.9692, desvío

porcentual medio (P) de 9.0278% y 9.1529% y un error estándar de humedad (SEM) de 0.0183 y 0.0227 respectivamente, para la isoterma a una temperatura de 25°C.

Tabla 12. Parámetros de ajuste de las isotermas de adsorción del ají seco 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.

MODELO	PARÁMETROS <sup>a</sup>	$R^2$	P (%)	SEM	DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS <sup>c</sup>
BET <sup>b</sup>	$X_m$ 0.0558	0.9975	5.9299	0.0186	TENDENCIOSO
	$C_{BET}$ 142.6435761				
GAB	$X_m$ 0.0707	0.9750	8.9928	0.0151	ALEATORIO
	$C_{GAB}$ 19.1385				
	$K_{GAB}$ 0.9389				
HALSEY	A 0.0431	0.9740	8.0641	0.0148	ALEATORIO
	B 1.3374				
OSWIN	A 0.1317	0.9711	10.4308	0.0148	LIGERAMENTE ALEATORIO
	B 0.5277				
CHUNG-PFOST	A -433.1314	0.9445	15.4808	0.0242	TENDENCIOSO
	B 10.5088				
HENDERSON	$k$ 10.3602	0.9530	12.8660	0.0200	TENDENCIOSO
	$n$ 1.3633				

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 – 0.44, solo se usaron los primeros cuatro datos.

c: La evaluación de los residuos se realizó a partir de las gráficas de los datos estimados vs. los valores residuales (Anexo2).

Fuente: Elaboración propia (2011).

Así mismo para la isoterma a una temperatura de 35°C los modelos de GAB y Halsey presentan los siguientes valores,  $R^2$  de 0.9729 y 0.9721, P de 8.3127% y 7.9517% y SEM de 0.0151 y 0.0152 respectivamente; por último para la isoterma a una temperatura de 40°C los modelos de GAB y Halsey muestran los siguientes valores,  $R^2$  de 0.9750 y 0.9740, P de 8.9928% y 8.0641% y SEM de 0.0151 y 0.0148 respectivamente. La distribución de los residuos (Anexo 2) fue aleatoria para los dos modelos a las tres temperaturas de estudio.

Resultados semejantes al reportado en este trabajo fueron observados por **Gabas (1998)**, quien al estudiar las isotermas de sorción de la pulpa y cáscara de uva Itália, concluyó que los modelos que mejor ajustaron los datos experimentales fueron el de Halsey y GAB. Así mismo indicó que no hubo diferencia en cuanto a los valores calculados por ambos modelos. **Ccalli (2003)** en su investigación sobre el secado de higos (*Ficus carica* L.), también mencionó que el modelo de GAB presentó el mejor ajuste para los datos experimentales de las isotermas de adsorción del higo seco. **Resende (2006)**, basándose en parámetros estadísticos recomendó el modelo de Halsey para la predicción de las isotermas de sorción de los granos de frejol (*Phaseolus vulgaris* L.), evaluadas en rango de temperaturas de 25°C a 45°C. Así también **Sousa (2008)** al estudiar las isotermas de sorción del higo (*Ficus carica* L.) *in natura* y deshidratado osmóticamente, indicó que los modelos de GAB y Halsey son los que mejor ajustaron los datos experimentales, con valores de  $R^2$  superiores al 97%. Del mismo modo. **Vega et al., (2006)** y **Choque (2009)**, concluyeron 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.) variedad "Canteño" respectivamente.

En las Figuras 11 y 12 se observa el ajuste de los datos experimentales del ají seco a las diferentes temperaturas de evaluación mediante los modelos de GAB y Halsey. Así también las Figuras 13, 14 y 15 muestra la coincidencia de ambos modelos en el ajuste de los datos experimentales en este trabajo, siendo ambos modelos ampliamente utilizados para describir el comportamiento de sorción de cereales como el maíz, trigo, arroz, ajonjolí y frutas secas (**Choque, 2009**). Por otra parte, el ajuste de de los datos experimentales con todos los modelos de isotermas, es mostrado en las Figuras 16, 17 y 18.

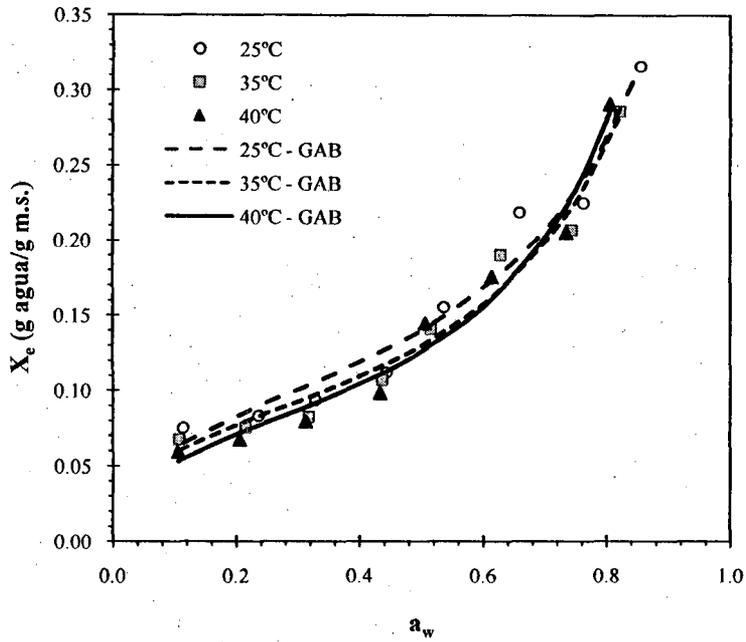


Figura 11. Isotermas de adsorción del ají seco a diferentes temperaturas ajustadas mediante el modelo de GAB.

Fuente: Elaboración propia (2011).

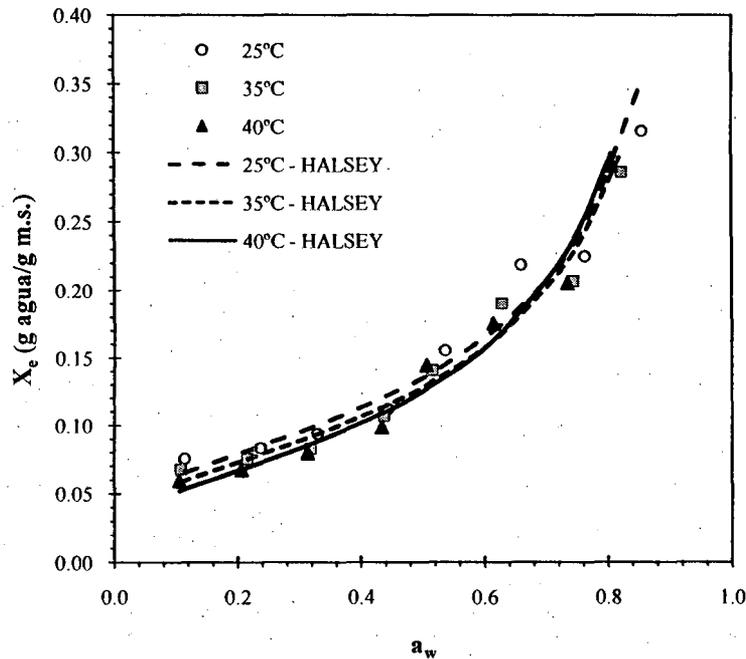


Figura 12. Isotermas de adsorción del ají seco a diferentes temperaturas ajustadas mediante el modelo de Halsey.

Fuente: Elaboración propia (2011).

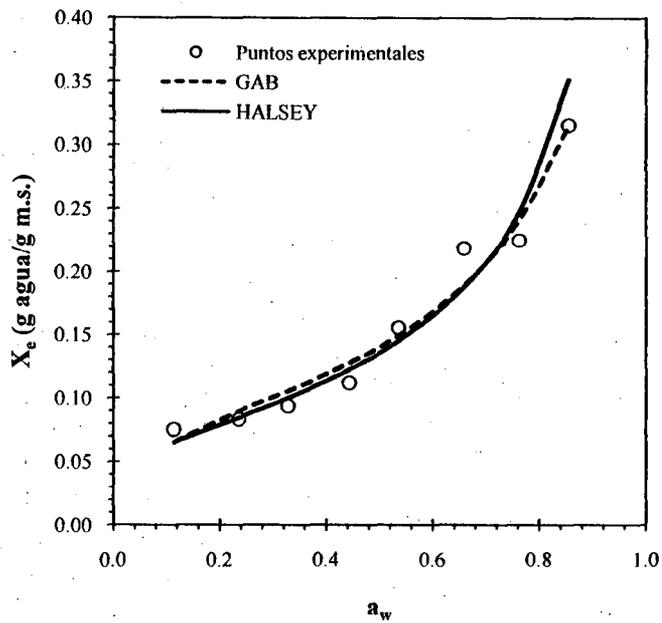


Figura 13. Isotherma de adsorción ajustada mediante los modelos de GAB y Halsey para el ají seco a la temperatura de 25°C.

Fuente: Elaboración propia (2011).

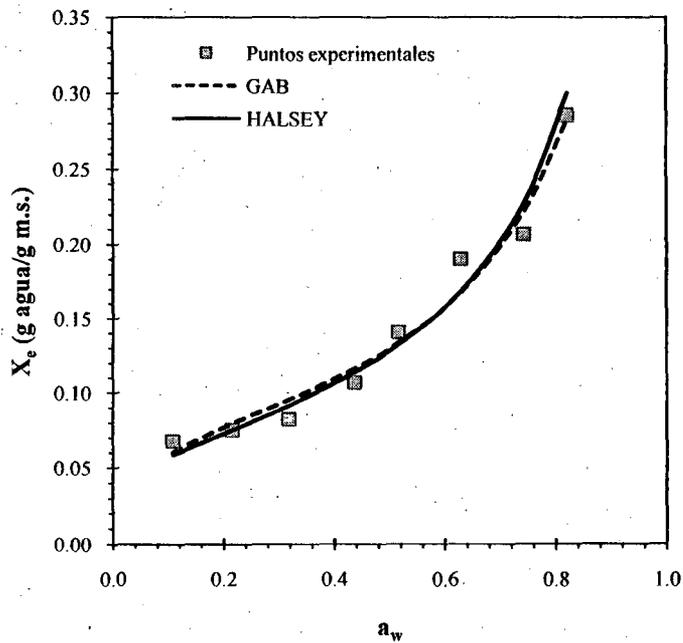


Figura 14. Isotherma de adsorción ajustada mediante los modelos de GAB y Halsey para el ají seco a la temperatura de 35°C.

Fuente: Elaboración propia (2011).

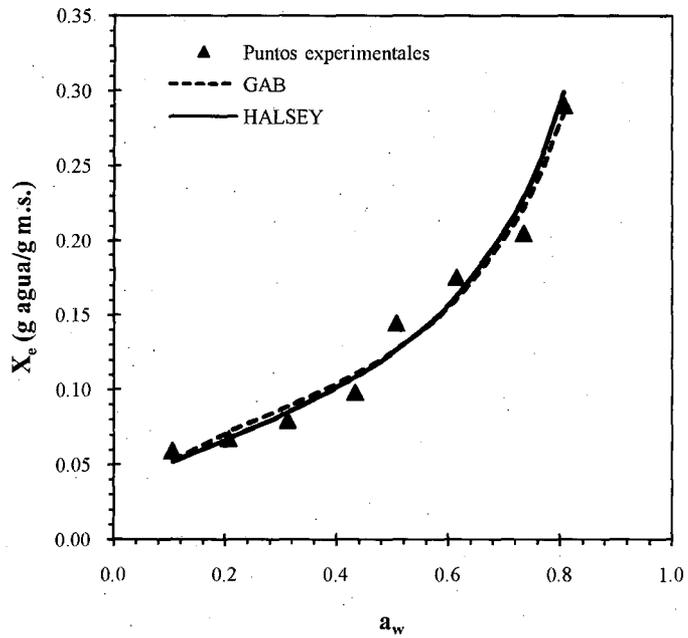


Figura 15. Isotherma de adsorción ajustada mediante los modelos de GAB y Halsey para el ají seco a la temperatura de 40°C.

Fuente: Elaboración propia (2011).

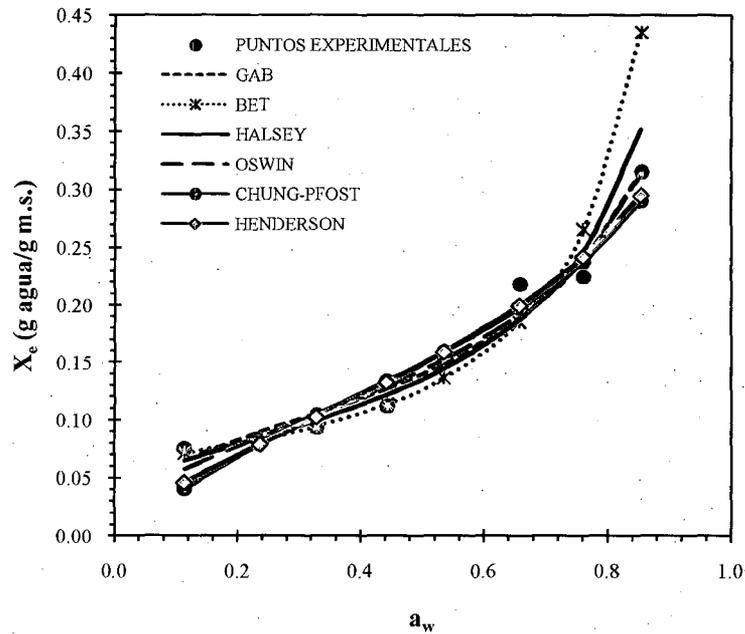


Figura 16. Isotherma de adsorción ajustada mediante los modelos indicados para el ají seco a la temperatura de 25°C.

Fuente: Elaboración propia (2011).

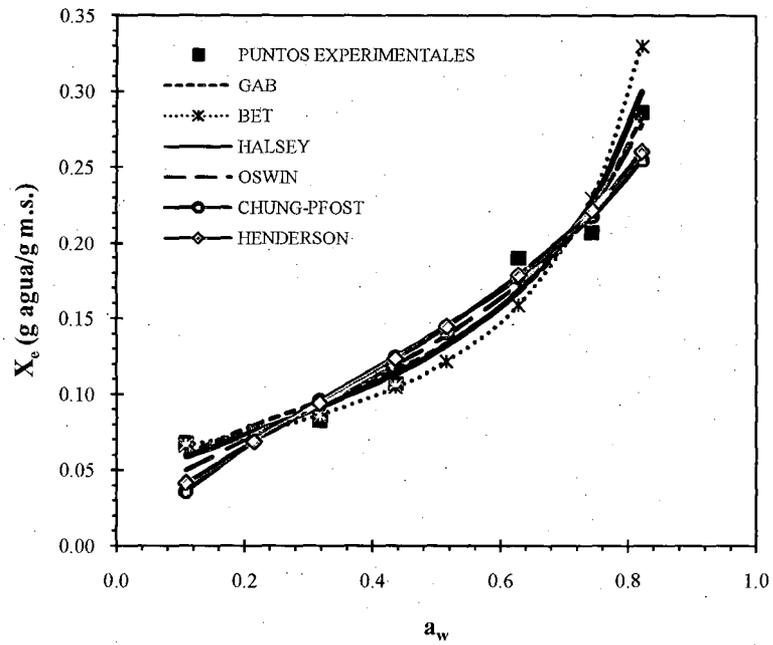


Figura 17. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos indicados para el ají seco a la temperatura de 35°C.  
 Fuente: Elaboración propia (2011).

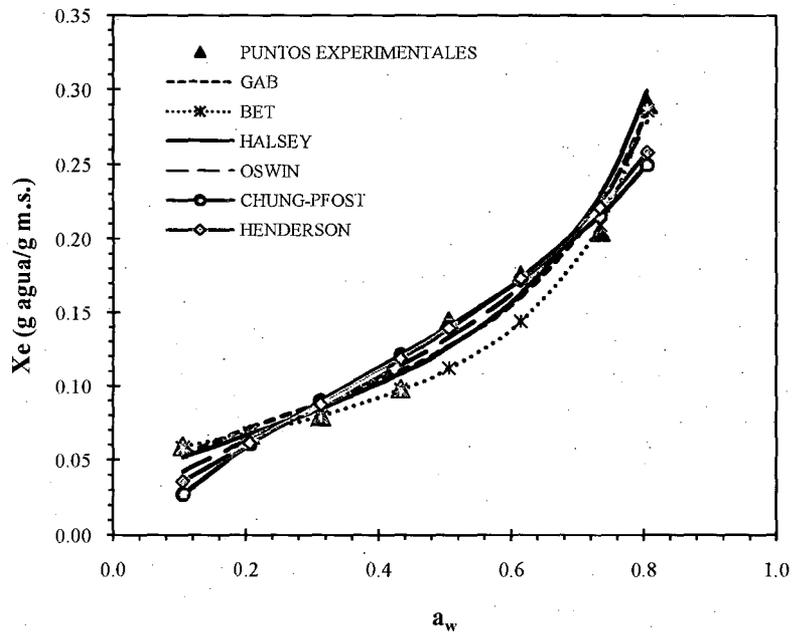


Figura 18. Isoterma de adsorción ajustada mediante los modelos indicados para el ají seco a la temperatura de 40°C.  
 Fuente: Elaboración propia (2011).

El valor de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) calculado por los modelos de GAB y BET (Tablas 10, 11 y 12) es de particular importancia, ya indica la cantidad de agua que esta fuertemente adsorbida a los sitios específicos en la superficie del alimento, y es considerado como el valor óptimo para asegurar su estabilidad (Fennema, 1996, citado por Veleriano, 2009). Los valores de  $X_m$  obtenidos para el ají seco varían de 0.0707 a 0.0850 g agua/g m.s. de acuerdo con el modelo de GAB y de 0.0558 a 0.0634 g agua/g m.s. de acuerdo con modelo de BET, observándose claramente que los valores de  $X_m$  del modelo de GAB son mayores con respecto a los obtenidos por el modelo de BET; resultados similares obtuvieron Vega *et al.* (2006), Valeriano (2009), Oliveira *et al.* (2009) y Ccalli (2003), para harina de maíz (*Zea mays* L.), jugo de huasai (*Euterpe oleraceae* Mart) atomizado, microalgas (*Spirulina platensis*) e higo seco (*Ficus carica* L.) respectivamente. Timmermann *et al.* (2001) cita en su estudio comparativo entre los dos modelos, que la  $X_m$  de los modelos de GAB y BET no son similares, siendo en la gran mayoría de veces los resultados obtenidos por GAB mayores a aquellos calculados por BET, de la misma forma como fue encontrado para el ají seco en este trabajo.

Por otra parte, conforme se muestra en las Tablas 10, 11 y 12, se observa una tendencia a la disminución de la  $X_m$  al incrementar la temperatura de 25°C a 40°C, este hecho también fue observado por Saravacos *et al.* (1986) para uva pasa, Moreira (1999) para tomate cereza (*Lycopersicon esculentum* var. *Cerasiforme*) y Alakali *et al.* (2009) para jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco. De acuerdo con Iglesias y Chirife (1976), citado por Nascimento (2006), el comportamiento de disminución de la  $X_m$  con el incremento de la temperatura, puede ser atribuido a la reducción del número de sitios activos para la unión con el agua, como resultado de los cambios físicos y químicos inducidos por la temperatura.

Conforme a lo mencionado anteriormente podemos afirmar que la  $X_m$  muestra dependencia con la temperatura, es así que al realizar un análisis de los valores de la  $X_m$  a través de una regresión lineal, se presenta la siguiente ecuación con un  $R^2$  de 0.9970.

$$X_m = -0.0017T + 0.111$$

Cáceres (2002), también encontró una relación lineal negativa para la  $X_m$  del modelo de GAB, para el secado de uva.

La constante  $C_{GAB}$  es función de la interacción entre los sitios activos del alimento y las moléculas de agua de la atmósfera (Choque, 2009). Los valores de  $C_{GAB}$  presentados en este trabajo no muestran una clara relación con el efecto de la temperatura, variando de 20.4664 para una temperatura de 25°C, 24.6760 a 35°C y 19.1385 para 40°C. Iglesias y Chirife (1982), citado por Martinelli (2008), estudiaron más de 30 diferentes productos alimenticios y observaron que en 74% de ellos el valor de  $C_{GAB}$  no disminuyó con el incremento de la temperatura, probablemente debido a los cambios irreversibles asociados con el incremento de la temperatura como reacciones enzimáticas y desnaturalización de proteínas.

El valor de  $K_{GAB}$  proporciona una medida de las interacciones entre las moléculas de agua de la multicapa con el adsorbente, y su valor tiende a estar entre el de la energía de las moléculas en la monocapa y el del agua líquida. Si  $K_{GAB}$  es igual a 1, las multicapas tienen propiedades de agua líquida y el comportamiento de sorción puede ser modelado por la ecuación de BET (Gabas *et al.*, 2007). Los valores de  $K_{GAB}$  del ají seco muestran un crecimiento de sus valores con el incremento de la temperatura en un rango de 0.8601 a 0.9389; un comportamiento idéntico fue observado por Alakali *et al.* (2009) al estudiar las isotermas de adsorción del jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco, Nascimento (2006) para pulpa de pitanga (*Eugenia uniflora* L.) atomizada y Kohayakawa (2004) para pulpa seca de mago (*Mangifera indica*).

Según el comportamiento del parámetro  $K_{GAB}$  mencionado con anterioridad, podemos afirmar que este parámetro presenta dependencia con la temperatura, por consiguiente el análisis de datos a través de una regresión lineal muestra una ecuación con un  $R^2$  de 0.9771.

$$K = 0.005T + 0.724$$

Al observar los parámetros del modelo de Halsey se puede apreciar el efecto de la temperatura en ellos, notándose un incremento del parámetro A y una disminución del

parámetro B con el incremento de la temperatura. Este comportamiento es semejante al reportado por Choque (2009) y Vega *et al.* (2006) en el estudio de las isothermas de adsorción del maíz morado (*Zea mays* L.) variedad “Canteño” y harina de maíz (*Zea mays* L.) respectivamente, Heano *et al.* (2009) también encontró un comportamiento similar en su estudio de isothermas de sorción en el café cereza (*Coffea arábica* L.).

#### 4.5. CALOR ISOTÉRICO DE ADSORCIÓN

Para determinar el calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) del ají seco, se consideraron los valores de  $X_e$  predeterminados a las diferentes temperaturas de evaluación mediante el modelo de Halsey, ya que presentó el mejor ajuste de los datos experimentales, así mismo los valores de  $a_w$  fueron calculados a partir de este modelo.

La Tabla 13 muestra los valores del calor isostérico de adsorción experimental y calculado mediante las ecuaciones 10 y 12 respectivamente.

Tabla 13. Calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) del ají seco a diferentes valores de humedad de equilibrio.

$X_e$ (b.s.)	$q_{st}$ (exp.) <sup>a</sup> (kJ/mol)	$q_{st}$ (cal.) <sup>b</sup> (kJ/mol)
0.06	23.6049	23.6429
0.08	13.3886	12.7272
0.09	8.4756	9.3379
0.11	4.8430	5.0267
0.13	3.0869	2.7059
0.17	1.3201	0.7841
0.24	0.1922	0.0897
0.32	-0.2986	0.0075

a: Calor isostérico de adsorción experimental, obtenido por la ecuación 10.

b: Calor isostérico de adsorción calculado, obtenido por la ecuación 12.

Fuente: Elaboración propia (2011).

La Figura 19 presenta datos de actividad de agua ( $a_w$ ) en función de la temperatura, para cada humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en la forma de isósteras. Notándose en esta figura, la influencia de la temperatura en las curvas, es decir, para bajos contenidos de humedad, la  $a_w$  aumenta 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 carica* L.) seco.

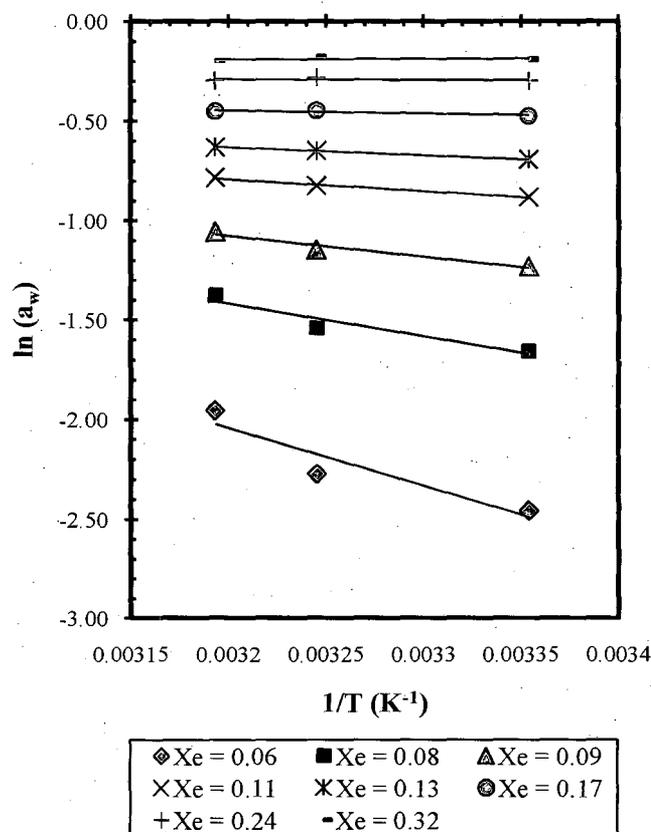


Figura 19. Curvas de  $\ln(a_w)$  versus  $1/T$  a diferentes humedades de equilibrio para el ají seco.

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la Figura 20 son presentados los valores del calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) en función del contenido de humedad de equilibrio ( $X_e$ ), estimados mediante la ecuación 12. En dicha figura se aprecia que el  $q_{st}$  decrece desde 23.6429 a 0.0075 kJ/mol, con el aumento de la  $X_e$  de 0.06 a 0.32 g agua/g m.s. (Tabla 13).

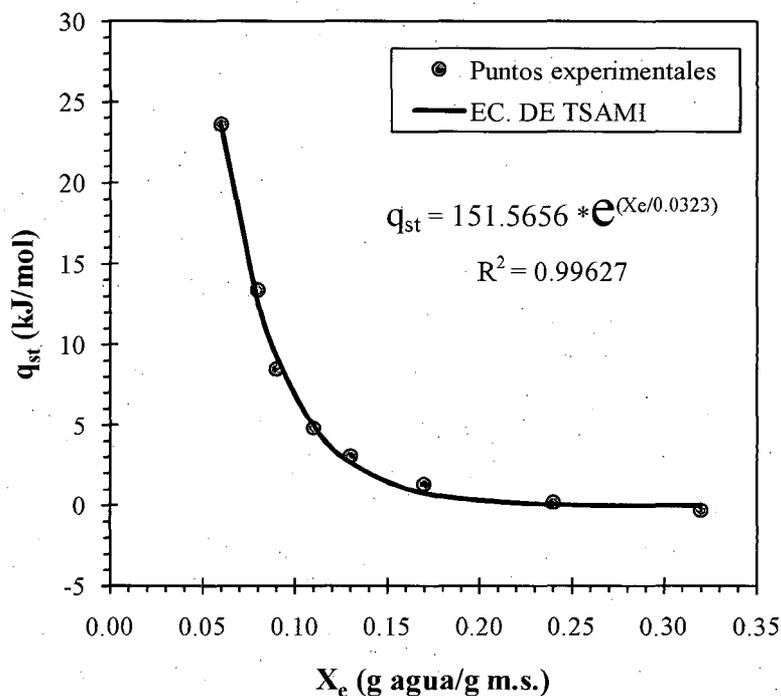


Figura 20. Influencia de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) en el calor de adsorción ( $q_{st}$ ) para el ají seco.

Fuente: Elaboración propia (2011).

Tsami *et al.* (1990), evaluaron los calores isostéricos de adsorción en varias frutas secas (uva, higo, ciruelo y albaricoque) y estos decrecen de 20 kJ/mol hasta valores cercanos a cero cuando el contenido de humedad se incrementa de 0.05 a 0.50 g agua/g m.s. Alakali *et al.* (2009), al estudiar las isotermas de adsorción en el jengibre (*Zinziber officinale*) seco observó que los  $q_{st}$  decrecieron de 10.113 a 0.851 kJ/mol con un incremento de la humedad de 0.10 a 0.22 g agua/g m.s.

Este comportamiento puede ser explicado considerándose que inicialmente la sorción ocurre en los sitios disponibles más activos, dando origen a una alta energía 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 altos calores de sorción de agua ( $q_{st}$ ) a bajos contenidos de humedad son una indicación de la fuerte interacción entre los componentes agua-alimento en las frutas secas.

Se aprecia en la Figura 20, que a elevados contenidos de humedad los valores de  $q_{st}$  para la adsorción llegan a ser ligeramente negativos. De acuerdo con Tsami (1991), los valores más negativos del  $q_{st}$  indican un mayor grado de agua ligada en la superficie del alimento.

Los datos experimentales del  $q_{st}$  para el ají seco en función de la  $X_e$  fueron ajustados a través de la ecuación exponencial de Tsami *et al.* (1990), el cual presenta los parámetros  $q_0$  y  $X_0$ . El resultado de este ajuste está descrito en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros  $q_0$  y  $X_0$  y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustados de la ecuación de Tsami *et al.* (1990).

Muestra	Parámetros <sup>a</sup>		$R^2$
	$q_0$	$X_0$	
Ají seco	151.5656	0.0323	0.9963

a: Parámetros obtenidos a un nivel de significancia del 5%.

Fuente: Elaboración propia (2011).

El ajuste de la ecuación exponencial de Tsami *et al.* (1990) presentó un coeficiente de determinación de 0.9963, con base a este valor, se puede decir que el modelo predice con precisión los valores del  $q_{st}$  del ají seco en función de la  $X_e$ .

#### 4.6. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

La dependencia con la temperatura de los parámetros termodinámicos del modelo de GAB ( $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $K_{GAB}$ ) se evaluaron con la ecuación de Arrhenius (Ecuación 13). El valor de los parámetros de GAB para cada temperatura es mostrado en la Tabla 15.

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

MODELO	PARÁMETROS	TEMPERATURAS		
		25°C	35°C	40°C
GAB	$X_m$	0.0850	0.0751	0.0707
	$C_{GAB}$	20.4664	24.6760	19.1385
	$K_{GAB}$	0.8601	0.8997	0.9389

Fuente: Elaboración propia (2011).

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 4), aplicando la Ecuación 13, 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 GAB.

MODELO	PARÁMETROS	$E_a$ (kJ/mol) <sup>a</sup>	$R^2$
GAB	$X_m$	-10.1597	0.999
	$C_{GAB}$	-0.7389	0.003
	$K_{GAB}$	4.5212	0.971

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

Fuente: Elaboración propia (2011).

La energía que se disipa, para que se adsorba agua hacia la superficie del ají seco, para formación de la monocapa ( $X_m$ ), es decir, para enlazarse sobre los grupos polares específicos del ají seco, es 10.1597 kJ/mol, para un intervalo de temperatura de 25°C a 40°C. Vega *et al.* (2006), determinó una  $E_a$  igual a 15.09 kJ/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 activos 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).

En la Tabla 16, se observa que el parámetro  $C_{GAB}$ , no presentó una dependencia con la temperatura, lo cual puede verse en los bajos valores de  $R^2$  y  $E_a$  que presentaron, 0.003 y 0.7389 kJ/mol respectivamente.

Por otra parte, el parámetro  $K_{GAB}$ , que proporciona una medida de las interacciones entre las moléculas de agua de la multicapa con el adsorbente, y su valor tiende a estar entre el de la energía de las moléculas en la monocapa y el del agua líquida, presentó una  $E_a$  de 4.5212 kJ/mol, con un  $R^2$  de 0.971, notándose claramente la influencia de la temperatura en este parámetros.

## V. CONCLUSIONES

- 5.1. Las isothermas de adsorción del ají seco exhibieron un comportamiento del tipo III para todas las temperaturas de estudio, similar a otros productos alimenticios.
- 5.2. La humedad de equilibrio del ají seco es directamente proporcional a la actividad de agua,  $a_w$  (humedad relativa) e inversamente proporcional al incremento de la temperatura para un mismo valor de actividad de agua,  $a_w$  (humedad relativa), siguiendo la misma tendencia de la mayoría de los productos agrícolas.
- 5.3. De acuerdo a los parámetros estadísticos, los modelos que mejor ajustaron los datos experimentales de las isothermas de adsorción del ají seco fueron los modelos de GAB y Halsey, con valores de  $R^2$  mayores a 96%, desvío porcentual medio (P) menores del 10% y errores estimados de humedad (SEM) inferiores a 0.022.
- 5.4. Las condiciones de almacenamiento, para asegurar la mayor estabilidad del ají seco es, una humedad del producto de hasta 8.5% en b.s. a una humedad relativa del ambiente de hasta 50%, para temperaturas de almacenamiento entre 25°C a 40°C.
- 5.5. El valor de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) del modelo de GAB presenta dependencia con la temperatura, disminuyendo de 0.0850 a 0.0707 g agua/g m.s. para el rango de temperatura de 25°C a 40°C. Así mismo, el parámetro  $K_{GAB}$ , muestra una dependencia lineal positiva con el incremento de la temperatura, aumentando de 0.8601 a 0.9389 en el mismo intervalo de temperatura. Por otra parte el valor de  $C_{GAB}$  es mayor que la unidad, indicando que el ají seco presenta alta capacidad de adsorción, por lo que es un producto que puede deteriorarse y ser fácilmente atacado por microorganismos si se almacena a humedades relativas mayores a 50%.
- 5.6. El calor isostérico de adsorción ( $q_{st}$ ) disminuye con el aumento del contenido de humedad en el ají seco, disminuyendo de 23.6429 a 0.0075 kJ/mol para humedades de

0.06 g agua/g m.s. a 0.32 g agua/g m.s. respectivamente, en el rango de temperaturas estudiadas. Así mismo para el cálculo del  $q_{st}$  en función del contenido de humedad del producto, se comprobó la validez de la ecuación propuesta por Tsami *et al.* (1990), obteniendo en el ajuste de los datos experimentales un  $R^2$  de 99.627%.

- 5.7. La influencia de la temperatura en los parámetros del modelo de GAB, se evaluó a través de la energía de activación  $E_a$  proveniente de la ecuación de Arrhenius. Obteniéndose valores de  $E_a$  de 10.1597 kJ/mol para la  $X_m$ , 0.7389 kJ/mol para el parámetro termodinámico  $C_{GAB}$  y 4.5212 kJ/mol para el parámetro  $K_{GAB}$ , observando claramente la influencia de la temperatura en la  $X_m$  y en el parámetro  $K_{GAB}$ .

## VI. RECOMENDACIONES

- 6.1. Estudiar la posibilidad de aprovechar integralmente del ají seco (*Capsicum annuum* L.), mediante la extracción de oleorresinas, de gran valor en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética.
- 6.2. Llevar a cabo un estudio para determinar la vida útil del ají seco (*Capsicum annuum* L.) durante su almacenamiento a las condiciones sugeridas en este trabajo.
- 6.3. Realizar un estudio en la determinación de las isotermas de desorción del ají (*Capsicum annuum* L.) a las temperaturas de 40°C, 50°C y 60°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).
- 6.4. Realizar un estudio de la cinética de secado del ají (*Capsicum annuum* L.) a temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C, teniendo en cuenta las isotermas de desorción.
- 6.5. Evaluar la influencia de las temperaturas de secado (40°C, 50°C y 60°C) en las isotermas de adsorción del ají seco (*Capsicum annuum* L.).

## VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Alakali, J., Irtwange, S. V. and Satimehin, A. (2009). **Moisture adsorption characteristics of ginger slices**. *Ciência y Tecnología de Alimentos*, Campinas, 29(1): 155-164. Campinas, São Paulo - Brasil.
2. A.O.A.C. (1990). **Official methods of analysis of the association of official analytical chemists**. Arlington, VA, USA.
3. Araujo, C. M. (2001). **Suco de camu-camu (*Myrciaria dubia* H.B.K Mc Vaugh) microencapsulado obtido através de secagem por atomização**. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
4. Arslan, N. and Togrul, H. (2006). **The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity**. *Journal of Stored Products Research*, 42: 112–135.
5. Badui, S. (1999). **Química de los alimentos**. Cuarta edición. Editorial Pearson Educación de México, S.A. de C.V. México.
6. Barbosa, A. (2003). **Encapsulação de oleoresina de páprica por atomização em goma arábica e em aglomerados porosos de amido/gelatina: estabilidade e aplicação**. Tese de Doutorado em Alimentos e Nutrição, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
7. Barbosa-Cánovas, G. y Vega-Mercado, H. (2000). **Deshidratación de alimentos**. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza - España.

8. 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.
9. Cáceres, B. N. (2002). **Simulação e otimização de um secador industrial de túnel para frutas**. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
10. Cardona, J. A., Lopera, G. L., Montoya, A. M., Montoya, A. M., Peña, J. D., Gil, M., Benavides, J. F., Caicedo, M. R., Ríos, L. A. y Restrepo, G. M. (2006). **Obtención de oleoresina de pimentón (*Capsicum annuum* L.)**. VITAE, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica, Universidad de Antioquia, 13(1): 5-9. Medellín, Medellín - Colombia.
11. Ccalli, H. (2003). **Secagem de figo (*Ficus carica* L.) da variedade "Gigante de Valinhos" em secador de bandejas**. Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
12. Cheftel, J. y Cheftel, H. (1976). **Introducción a la bioquímica y tecnología de alimentos, Volumen I**. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza - España.
13. Choque, D. (2009). **Evaluación de las isotermas de adsorción del Maíz Morado (*Zea mays* L.) – variedad Canteño**. 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.
14. Clemente, G. (2003). **Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón**. Tesis Doctoral para obtener el grado de Doctora en Ciencia y Tecnología de

Alimentos, Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia - España.

15. Corrêa, P. C., Duarte, A. L. Resende, O. e Menezes, D. (2005). **Obtenção e modelagem das isotermas de dessorção e do calor isostérico de dessorção para grãos de trigo.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, 7(1): 39-48. Campina Grande, Paraíba – Brasil.
16. 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.
17. Dorantes, L., Ortiz, A., Juárez, K. y Gutierrez, G. **Estudio del secado convectivo de *Capsicum annuum* variedad poblano.** Alimentos Ciencia e Ingeniería, Ambato, 16(3): 205 – 207. Ambato – Ecuador.
18. Duarte, A. L. (2008). **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento.** Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais – Brasil.
19. Eluan, A., Meller, L. H. y Silva, R. (2008). **Comportamento higroscópico do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e cupuaçu (*Teobroma grandiforum* Schum.) em pó.** Ciência y Tecnología de Alimentos, Campinas, 28(4): 895-901. Campinas, São Paulo – Brasil.
20. Espino, R. C. (1995). **Evaluación de los modelos de GAB, BET, Pfo et al. y Henderson-Thompson en la descripción de isotermas de adsorción en sémola de maíz y maíz opaco – 2 (*Zea mays* L.).** Tesis de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.

21. Fadini, A. L., Pereira, P. M., Pereira, D. C., Zaratini, F., Bonifácio, M. e Batista, G. (2006). **Isotermas de sorção de umidade e estudo de estabilidade de Macadâmias Drageadas.** Brazilian Journal of Food Technology, 9(2): 83-88.
22. Feitosa, R. M. (1998). **Caracterização físico-química do suco e pó de acerola (*Malpighia punicefoli* L.).** Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
23. Fennema, O. R. (2000). **Química de los alimentos.** Segunda edición. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza - España.
24. Ferreira, C. D. y Pena, R. S. (2003). **Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*).** Ciência y Tecnologia de Alimentos, Campinas, 23(2): 251-255. Campinas, São Paulo – Brasil.
25. Fiorentin, L. D., Menon, B. T., Barros, S. T. D., Pereira, N. C., Lima, O. C. e Modense, A. N. (2010). **Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, 14(6): 653-659. Campina Grande, Paraíba – Brasil.
26. Gabas, A. L. (1998). **Secagem de uva Itália em leito fixo.** Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
27. Gabas, A. L., Nicoletti, V. R., Amaral, P. J. y Telis-Romero J. (2007). **Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder.** Journal of Food Engineering, 82: 246-252.
28. Gabas, A. L., Telis-Romero J., Giraldo-Gomez, G. I. y Nicoletti, V. R. (2009). **Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo (*Solanum***

- quitoense Lam*) en polvo con encapsulantes. *Ciência y Tecnología de Alimentos*, Campinas, 29(4): 911-918. Campinas, São Paulo – Brasil.
29. González, M. M y Orellana, A. D. (2003). **Recolección de germoplasma de chile tipo habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en el departamento del Peten.** Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA).
30. Henao, J. D., Queiroz, M. R. e Haj-Issa, N. M. A. (2009). **Umidade de equilíbrio de café cereja descascado baseada em métodos estático e dinâmico.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 13(4): 470-476. Campina Grande, Paraíba – Brasil.
31. Hernández, J. A., Ochoa, A. A., López, E. y García, H. S. (2009). **Extracción de capsaicinoides durante la deshidratación osmótica de chile Habanero en salmuera.** *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 7(2): 127–134. México.
32. Iguedjtal, T., Louka, N. and Allaf, K. (2007). **Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression.** *Journal of Food Engineering* (2007), doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.06.028.
33. Kohayakawa, M. (2004). **Secagem de manga Haden utilizando secador de leito fixo e secador acoplado a bomba de calor.** Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
34. Kurozawa, L. E. (2005). **Efeito das condições de processo na cinética de secagem de cogumelo (*Agaricus blazei*).** Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.

35. Kurozawa, L. E., El-Aouar, Â. A. e Murr, F. E. X. (2005). **Obtenção de isotermas de dessorção de cogumelo *in natura* e desidratado osmoticamente.** *Ciência y Tecnología de Alimentos*, Campinas, 25(4): 828-834. Campinas, São Paulo - Brasil.
36. Lima, E. E. (2006). **Produção e armazenamento da farinha de facheiro (*Cereus squamosus*).** Tese de Mestrado em Engenharia Agrícola, Área de concentração em armazenamento e processamento de produtos agrícolas, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba – Brasil.
37. Leal, C. M. (2010). **Caracterização e análise experimental do recobrimento de sementes de jambu (*Spilanthes oleracea*) em leite fluidizado.** Tese de Doutorado em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
38. Martinelli, L. (2008). **Construção e desenvolvimento de um secador de leite pulso-fluidizado para secagem de pastas e polpas.** Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. São José do Rio Preto, São Paulo - Brasil.
39. Marques, M. A. (2009). **Influência de encapsulantes e do método de secagem nas propriedades físico-químicas e atributos de qualidade de polpa de maracujá (*passiflora edulis f. flavicarpa*) em pó.** Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. São José do Rio Preto, São Paulo - Brasil.
40. Marques, M. A., Telis-Romero, J. y Nicoletti, V. R. (2010). **Efect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp (*Passiflora eduli*) powder.** *Ciência y Tecnología de Alimentos*, Campinas, 30(4): 993-1000. Campinas, São Paulo - Brasil.
41. Melgarejo, L. M., Hernández, M. S., Berrera, J. A. y Bardales, X. (2004). **Caracterización y usos potenciales del banco de germoplasma de ají amazónico.**

Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Biología. Bogotá - Colombia.

42. Mendonça, L., Fernandes, N., Marangoni, C., Mendes, C. E. y Oliveira, A. (2008). **Atividade antioxidante de pimentas do gênero Capsicum**. Ciência y Tecnologia de Alimentos, Campinas, São Paulo - Brasil.
43. Molina-Filho, L., Marques, M. A. Telis-Romero, J. y Romeiro, S. H. (2006). **Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma Macroparum*)**. Ciência y Tecnologia de Alimentos, Campinas, 26(2): 453-458. Campinas, São Paulo - Brasil.
44. Moreira, P. (1999). **Estudo da cinética de desidratação por imersão e secagem de tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*)**. Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
45. Nascimento, F. M. (2006). **Secagem e armazenamento da polpa de pitanga (*Eugenia uniflora* L.)**. Tese de Mestrado em Engenharia Agrícola, Área de concentração em armazenamento e processamento de produtos agrícolas, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba – Brasil.
46. Nogueira, R. (1990). **Comportamento higroscópico do suco de laranja liofilizado**. Tese de Doutorado em Ciência dos Alimentos, Área de Bromatologia, Faculdade de Ciência Farmacêuticas, Universidade de São Paulo. São Paulo - Brasil.
47. Oliveira, E. G., Rosa, G. S. Moraes, M. A. y Pinto, A. A. (2009). **Moisture sorption characteristics of microalgae (*Spirulina platensis*)**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 26(1): 189-197.

48. 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. Campinas, São Paulo - Brasil.
49. Pons, G. (1981). **Fisicoquímica, curso básico para las profesiones científicas**. Edición 5ª. Editorial Universo S.A. Lima – Perú.
50. Rengifo, E. L., Ruiz, L., Ríos, J., Pérez, D. y Ortiz, S. (2001). **Plantas medicinales y biocidas de la Amazonía Peruana**. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, IIAP. Iquitos – Perú.
51. Resende, O., Corrêa, P. C. Duarte, A. L. e Menezes, D. (2006). **Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão**. *Ciência y Tecnología de Alimentos*, Campinas, 26(3): 626-631. Campinas, São Paulo - Brasil.
52. Restrepo, M., Llanos, N. y Fonseca, C. E. (2007). **Composición de las oleorresinas de dos variedades de ají picante (habanero y tabasco) obtenidas mediante lixiviación con solventes orgánicos**. *Revista Lasallista de Investigación*. 4(1): 14-19. Antioquia – Colombia.
53. Reyes, M., Gómez-Sánchez, L., Espinoza, C., Bravo, F., Ganoza, L. y Centro Nacional de Alimentación y Nutrición. (2009). **Tablas Peruanas de Composición de Alimentos**. Comité editor Instituto Nacional de Salud – Ministerio de Salud del Perú. Lima – Perú.
54. Saravacos, G. D., Tsiourvas, D. A. y Tsami, E. (1986). **Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultanas raisins**. *Journal of Food Science*, 51(2): 381-387.

55. Silva, A. L. (1999). **Obtenção e avaliação de oleoresina de páprica**. Tese de Doutorado em Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
56. Silva, M. M., Gouveia, J. P. G. e Almeida, F. A. C. (2002). **Dessorao e calor isostérico em polpa de manga (*Mangifera indica* L.)**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, 6(1): 123-127. Campina Grande, Paraíba – Brasil.
57. Silva, R., Belo, N. y Costa M. D. (2010). **Comportamento higroscópico do aai em pó**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, 12(2): 153-161. Campina Grande, Paraíba – Brasil.
58. Siripatrawan, U. and Jantawat, P. (2006). **Determination of moisture sorption isotherms of jasmine rice crackers using BET and GAB models**. Food Science and Technology International, 12(6):459–465.
59. Sousa, S. (2008). **Obtenao de figos secos por desidrataao osmótica e secagem convectiva**. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
60. Sulamytha, T. (2009). **Comportamento higroscópico de pós de diferentes variedades de manga (*mangifera indica* L.)**. Tese de Mestrado em Tecnologia de Alimentos, rea de concentraao: Ciências e Tecnologia de Alimentos, Departamento de Tecnologia de Alimentos Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – Brasil.
61. Telis-Romero, J., Kohayakawa, M. N., Silveira, V. Pedro, M. A. M. e Gabas, A. L. (2005). **Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango**. Ciência y Tecnologia de Alimentos, Campinas, 25(2): 297-303. Campinas, São Paulo - Brasil.

62. Timmermann, E. O., Chirife, J. y Iglesias, H. A. (2001). **Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?**. Journal of Food Engineering, 48: 19-31.
63. Tsami, E., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D. and Saravacos, G. D. (1990). **Heat of sorption of water in dried Fruits**. International Journal of Food Science and Technology, 25: 350-359.
64. Tsami, E. (1991). **Net isosteric heat of sorption in dried fruits**. Journal of Food Engineering, 14: 327-335.
65. Valeriano, R. (2009). **Secagem por atomização do suco do açaí: Influência das variáveis do processo, qualidade e estabilidade do produto**. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
66. Vega, A., Lara, E. y Lemus, R. (2005). **Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.)**. Ciência y Tecnología de Alimentos, Campinas, 26(4): 821-827. Campinas, São Paulo - Brasil.
67. Vergara, D., Lozada, I. y Aguilar, J. (2006). **Efecto de la capsaicina sobre la producción de TNF- $\alpha$  en células mononucleares. Estudio piloto**. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública. 23(1): 52-55. Lima – Perú.
68. Villachica, H. (1996). **Frutales y Hortalizas Promisorias de la Amazonia**. Tratado de Cooperación Amazónica, TCA. Lima - Perú.
69. Yu, L., Mazza, G. and Jayas, S. (1999). **Moisture sorption characteristics of freeze-dried, osmofreeze-dried, y osmo-air-dried cherries y blueberries**. American Society of Agricultural Engineers, 42(1): 141-147.

70. Zug, J. (2002a). **Isotermas de adsorción: Bases Mecánico-Estadísticas**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires – Argentina.
71. Zug, J. (2002b). **Fisicoquímica Especial. Isoterma de sorción de tres etapas y modelos de sorción restringida**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires – Argentina.

# **ANEXOS**

**ANEXO 1. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DEL AJÍ (*Capsicum annuum* L.) SECO: MODELOS DE GAB, BET, HALSEY, OSWIN, CHUNG-PFOST Y HENDERSON.**

**Tabla 17. Valores experimentales y calculados de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) del ají (*Capsicum annuum* L.) seco, obtenidos mediante los modelos evaluados a 25°C.**

ISOTERMA A 25°C			VALORES DE HUMEDADES DE EQUILIBRIO CALCULADOS, $X_e$ (cal.) <sup>a</sup>					
Solución								
salina	$a_w$	$X_e$ (exp.)	GAB	BET	HALSEY	OSWIN	CHUNG-PFOST	HENDERSON
saturada								
LiCl	0.1142	0.0753	0.0651	0.0715	0.0651	0.0580	0.0407	0.0462
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.2367	0.0753	0.0896	0.0830	0.0846	0.0855	0.0797	0.0790
MgCl <sub>2</sub>	0.3287	0.0936	0.1054	0.0944	0.0999	0.1046	0.1043	0.1026
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.4432	0.1119	0.1272	0.1138	0.1222	0.1297	0.1340	0.1328
MgNO <sub>3</sub>	0.5358	0.1554	0.1491	0.1365	0.1449	0.1528	0.1593	0.1592
NaNO <sub>3</sub>	0.6585	0.2186	0.1889	0.1856	0.1875	0.1917	0.1974	0.1995
NaCl	0.7617	0.2249	0.2402	0.2659	0.2469	0.2397	0.2382	0.2422
KCl	0.8546	0.3159	0.3152	0.4358	0.3515	0.3138	0.2904	0.2954

a: Valores de humedad de equilibrio en g agua/g m.s.

Fuente: **Elaboración propia (2011).**

Tabla 18. Valores experimentales y calculados de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) del ají (*Capsicum annuum* L.) seco, obtenidos mediante los modelos evaluados a 35°C.

ISOTERMA A 35°C			VALORES DE HUMEDADES DE EQUILIBRIO CALCULADOS, $X_e$ (cal.) <sup>a</sup>					
Solución								
salina	$a_w$	$X_e$ (exp.)	GAB	BET	HALSEY	OSWIN	CHUNG-PFOST	HENDERSON
saturada								
LiCl	0.1081	0.0679	0.0604	0.0662	0.0585	0.0498	0.0358	0.0414
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.2155	0.0753	0.0797	0.0753	0.0752	0.0733	0.0694	0.0690
MgCl <sub>2</sub>	0.3180	0.0826	0.0955	0.0866	0.0916	0.0942	0.0958	0.0940
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.4363	0.1070	0.1163	0.1048	0.1139	0.1198	0.1250	0.1236
MgNO <sub>3</sub>	0.5154	0.1408	0.1337	0.1219	0.1324	0.1392	0.1452	0.1448
NaNO <sub>3</sub>	0.6280	0.1902	0.1673	0.1588	0.1681	0.1733	0.1772	0.1788
NaCl	0.7430	0.2069	0.2219	0.2298	0.2275	0.2235	0.2178	0.2218
KCl	0.8211	0.2859	0.2832	0.3301	0.3000	0.2782	0.2548	0.2604

a: Valores de humedad de equilibrio en g agua/g m.s.

Fuente: **Elaboración propia (2011).**

Tabla 19. Valores experimentales y calculados de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) del ají (*Capsicum annuum* L.) seco, obtenidos mediante los modelos evaluados a 40°C.

ISOTERMA A 40°C			VALORES DE HUMEDADES DE EQUILIBRIO CALCULADOS, $X_e$ (cal.) <sup>a</sup>					
Solución								
salina	$a_w$	$X_e$ (exp.)	GAB	BET	HALSEY	OSWIN	CHUNG-PFOST	HENDERSON
saturada								
LiCl	0.1054	0.0594	0.0532	0.0589	0.0519	0.0426	0.0272	0.0360
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.2061	0.0674	0.0720	0.0684	0.0677	0.0646	0.0609	0.0614
MgCl <sub>2</sub>	0.3131	0.0796	0.0890	0.0800	0.0852	0.0870	0.0901	0.0877
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.4330	0.0983	0.1107	0.0975	0.1088	0.1142	0.1213	0.1188
MgNO <sub>3</sub>	0.5060	0.1446	0.1274	0.1122	0.1269	0.1333	0.1409	0.1393
NaNO <sub>3</sub>	0.6140	0.1754	0.1608	0.1439	0.1629	0.1682	0.1727	0.1736
NaCl	0.7342	0.2052	0.2224	0.2094	0.2292	0.2251	0.2161	0.2212
KCl	0.8056	0.2907	0.2855	0.2866	0.2994	0.2788	0.2501	0.2584

a: Valores de humedad de equilibrio en g agua/g m.s.

Fuente: **Elaboración propia (2011).**

ANEXO 2. EVALUACIÓN DE LOS RESIDUALES EN LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN PARA EL AJÍ (*Capsicum annum* L.) SECO.

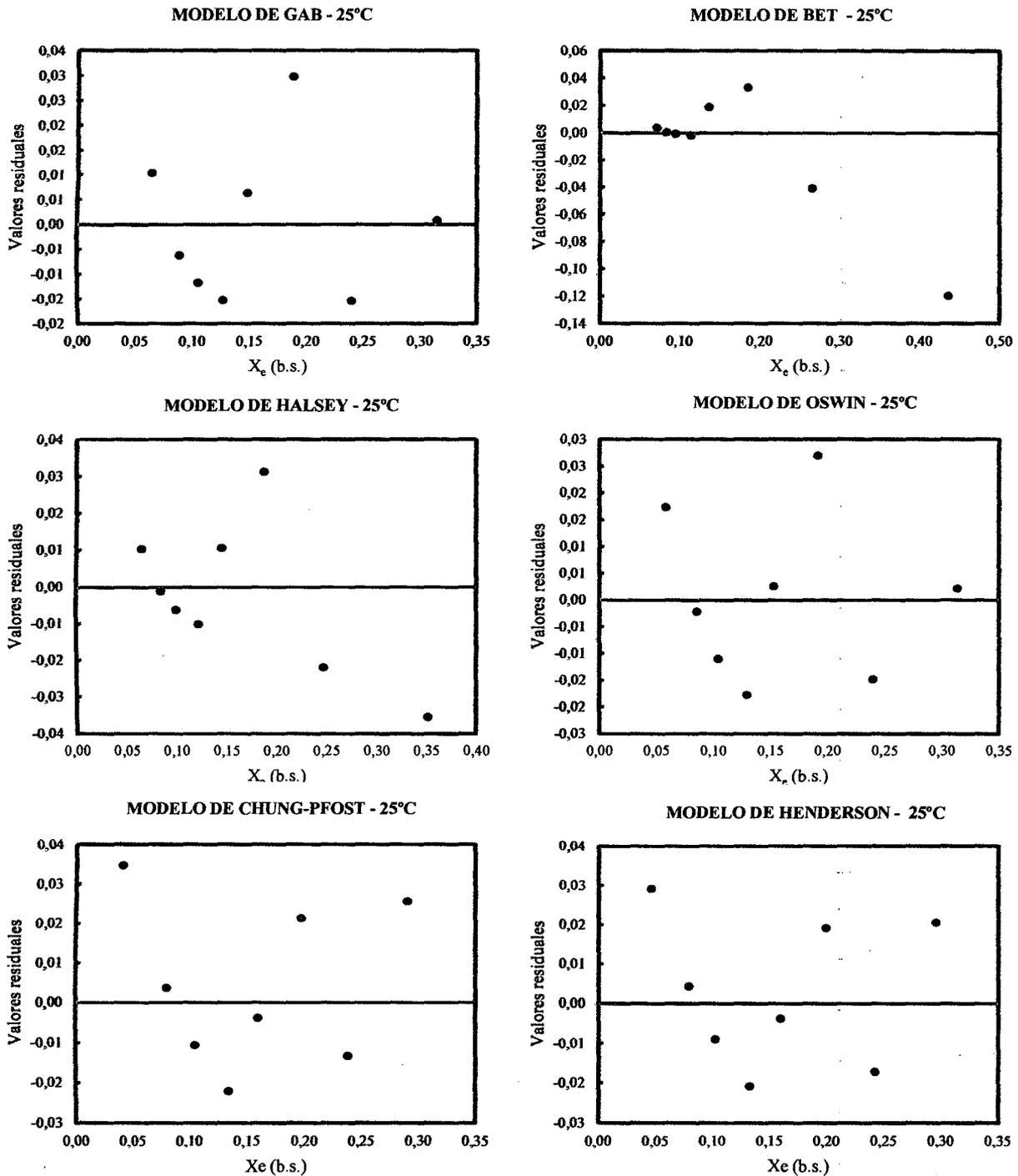


Figura 21. Distribución de los residuos de los modelos de isotermas utilizados para la obtención de las isotermas de adsorción del ají seco a 25°C.

Fuente: Elaboración propia (2011).

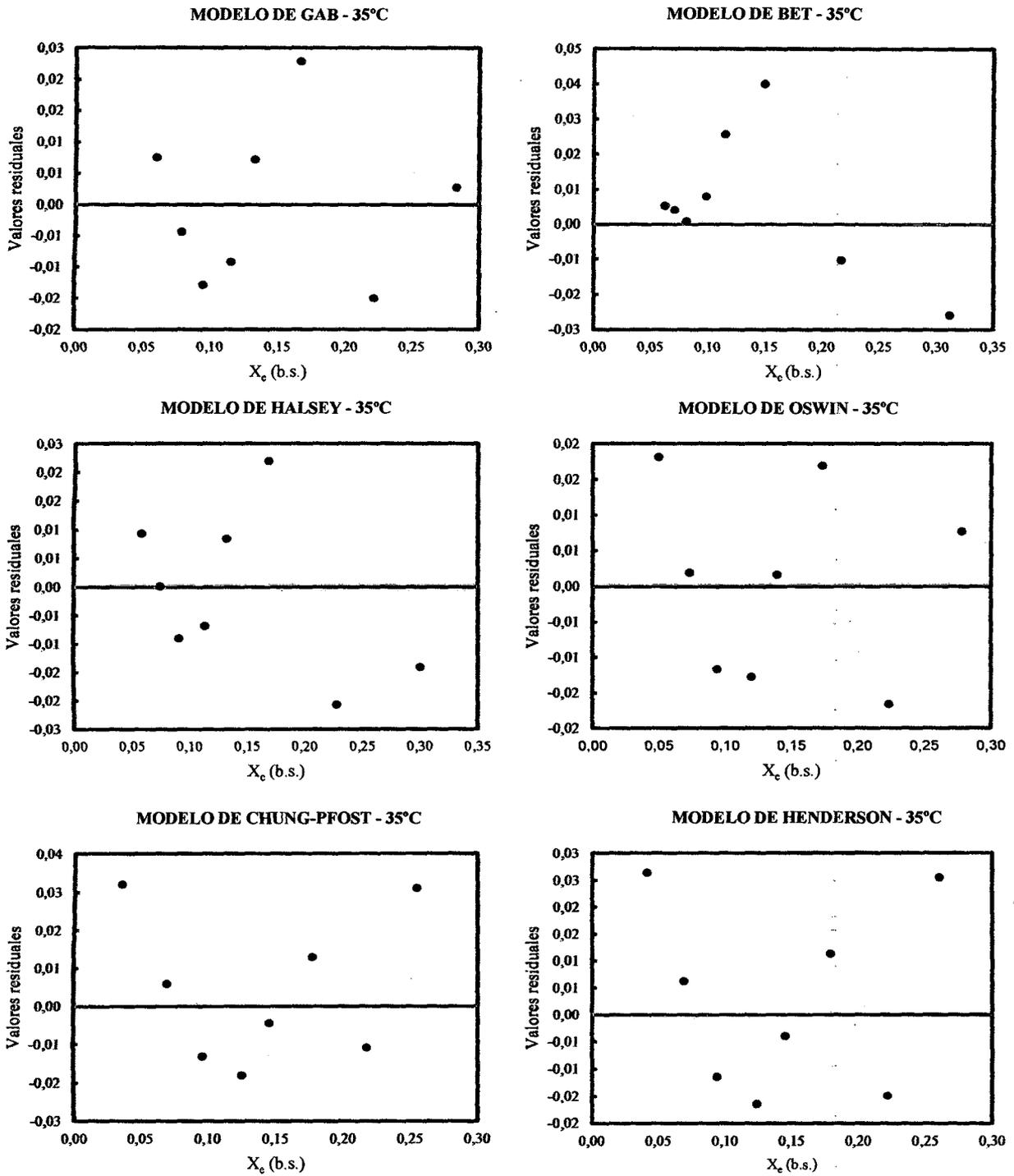


Figura 22. Distribución de los residuos de los modelos de isothermas utilizados para la obtención de las isothermas de adsorción del ají seco a 35°C.

Fuente: Elaboración propia (2011).

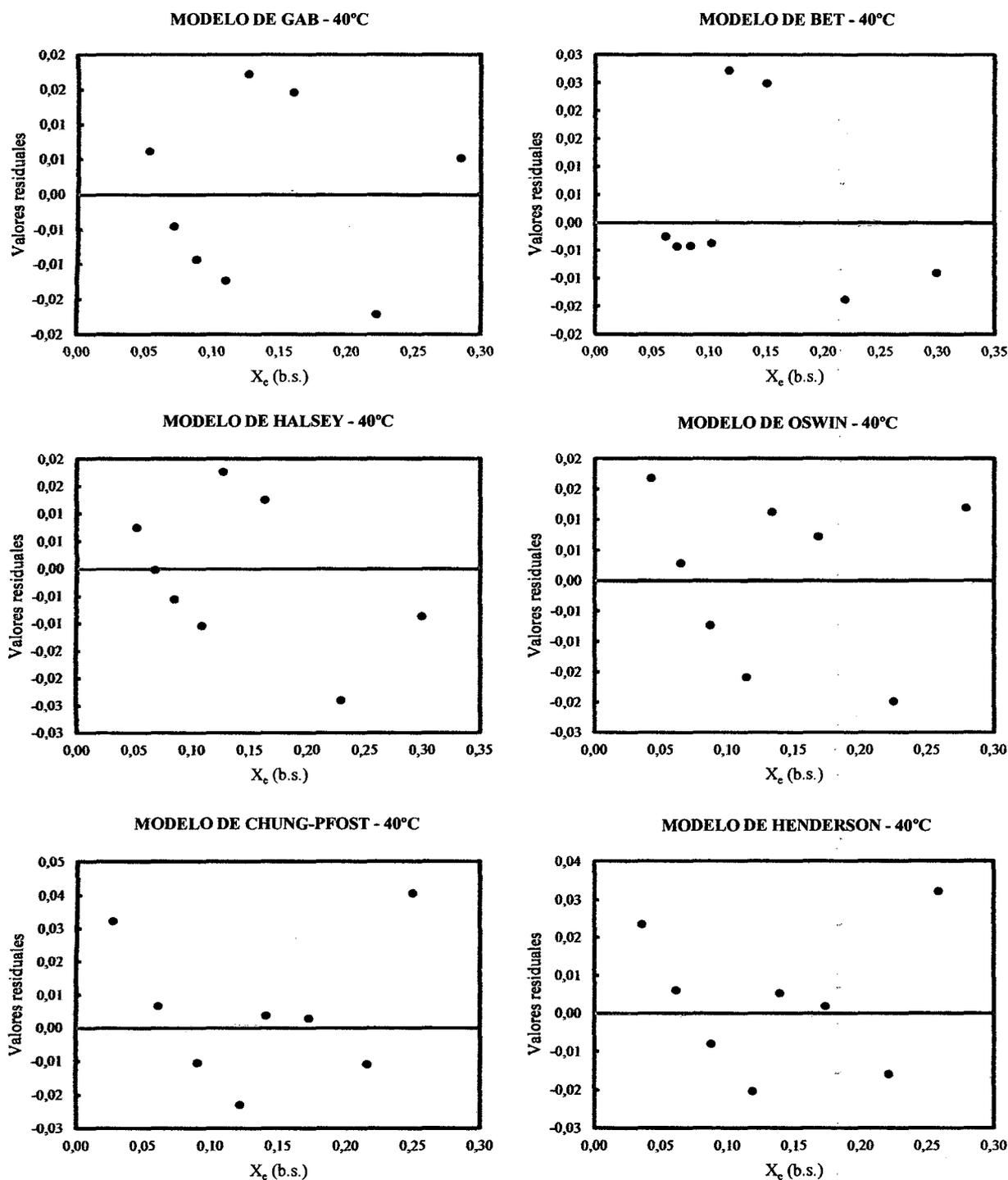


Figura 23. Distribución de los residuos de los modelos de isothermas utilizados para la obtención de las isothermas de adsorción del ají seco a 40°C.

Fuente: Elaboración propia (2011).

**ANEXO 3. DATOS DE  $a_w$  y  $q_{st}$  DETERMINADOS A PARTIR DEL MODELO DE HALSEY, CONSIDERANDO EL RANGO DE  $X_e$  DE 0.06 A 0.32 g agua/g m.s. A LAS TEMPERATURAS DE ESTUDIO.**

**Tabla 20. Parámetros del modelo de Halsey<sup>a</sup>, para determinar la  $X_e$  y  $a_w$**

25°C		35°C		40°C	
A	B	A	B	A	B
0.0341	1.4994	0.0331	1.4832	0.0431	1.3374

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

Fuente: Elaboración propia (2011).

**Tabla 21. Valores de  $a_w$  y  $X_e$  determinados mediante el modelo de Halsey.**

25°C		35°C		40°C	
$X_e^a$	$a_w$	$X_e^a$	$a_w$	$X_e^a$	$a_w$
0.06	0.0858	0.06	0.1031	0.06	0.1417
0.08	0.1910	0.08	0.2148	0.08	0.2529
0.09	0.2923	0.09	0.3178	0.09	0.3484
0.11	0.4146	0.11	0.4389	0.11	0.4572
0.13	0.5009	0.13	0.5229	0.13	0.5322
0.17	0.6229	0.17	0.6403	0.17	0.6376
0.24	0.7424	0.24	0.7543	0.24	0.7425
0.32	0.8285	0.32	0.8361	0.32	0.8207

a: Valor promedio de la tres temperaturas

Fuente: Elaboración propia (2011).

Tabla 22. Valores de  $\ln(a_w)$  y  $1/T$  ( $K^{-1}$ ) a la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) correspondiente

HUMEDAD DE EQUILIBRIO, $X_e$ (b.s.)								
	0,06	0,08	0,09	0,11	0,13	0,17	0,24	0,32
$1/T$ ( $K^{-1}$ )	$\ln(a_w)$							
0.00335402	-2.45551567	-1.65570277	-1.22994519	-0.88035559	-0.6912935	-0.47338067	-0.29790355	-0.18818243
0.00324517	-2.2716016	-1.53822147	-1.14634507	-0.82348355	-0.64832432	-0.44577428	-0.28193608	-0.17898098
0.00319336	-1.95379312	-1.37470673	-1.0545	-0.7825701	-0.6308	-0.44997276	-0.29770189	-0.19762332

Fuente: Elaboración propia (2011).

Tabla 23. Valores experimentales y calculados de  $q_{st}$  a diferentes  $X_e$

$X_e$ (b.s.)	$q_{st}$ (kJ/mol) <sup>a</sup>	
	Experimental <sup>b</sup>	Calculado <sup>c</sup>
0.06	23.6049	23.6429
0.08	13.3886	12.7272
0.09	8.4756	9.3379
0.11	4.8430	5.0267
0.13	3.0869	2.7059
0.17	1.3201	0.7841
0.24	0.1922	0.0897
0.32	-0.2986	0.0075

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

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 (2011).

**ANEXO 4. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN  $E_a$  CALCULADO A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE ARRHENIUS, PARA LOS PARÁMETROS  $X_m$ ,  $C_{GAB}$  Y  $K_{GAB}$  DEL MODELO DE GAB.**

**Tabla 24. Datos para el cálculo de la  $E_a$  de la  $X_m$ .**

T (°C)	$X_m$	T(°K)	$\ln(X_m)$	1/T (K <sup>-1</sup> )
25	0.08599065	298.15	-2.45351667	0.00335402
35	0.07506076	308.15	-2.58945731	0.00324517
40	0.07071687	313.15	-2.64907117	0.00319336
<b>R = 0.008314 kJ/mol-K</b>				
<b>-<math>E_a</math>/R = 1222</b>				
<b><math>E_a</math> = -10.1597 kJ/mol</b>				

**Tabla 25. Datos para el cálculo de la  $E_a$  del parámetro  $C_{GAB}$ .**

T (°C)	$C_{GAB}$	T(°K)	$\ln(C_{GAB})$	1/T (K <sup>-1</sup> )
25	20.4663559	298.15	3.01878236	0.00335402
35	24.6760416	308.15	3.2058328	0.00324517
40	19.1384852	313.15	2.95170124	0.00319336
<b>R = 0.008314 kJ/mol-K</b>				
<b>-<math>E_a</math>/R = 88.88</b>				
<b><math>E_a</math> = -0.7389 kJ/mol</b>				

**Tabla 26. Datos para el cálculo de la  $E_a$  del parámetro  $K_{GAB}$ .**

T (°C)	$K_{GAB}$	T(°K)	$\ln(K_{GAB})$	1/T (K <sup>-1</sup> )
25	0.85771198	298.15	-0.15348692	0.00335402
35	0.8996555	308.15	-0.10574337	0.00324517
40	0.93889861	313.15	-0.06304778	0.00319336
<b>R = 0.008314 kJ/mol-K</b>				
<b>-<math>E_a</math>/R = -543.8</b>				
<b><math>E_a</math> = 4.5212 kJ/mol</b>				

Fuente: Elaboración propia (2011).

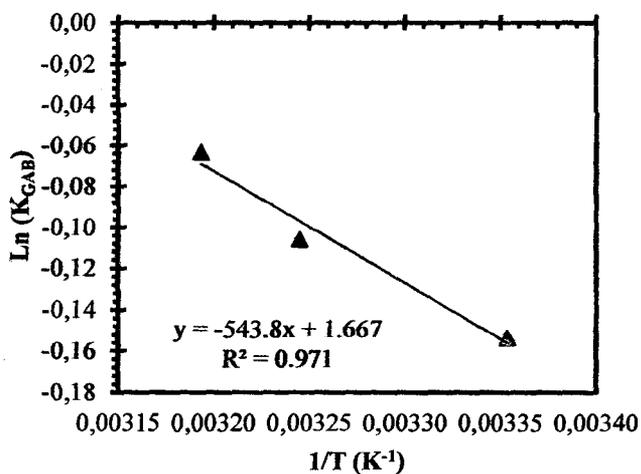
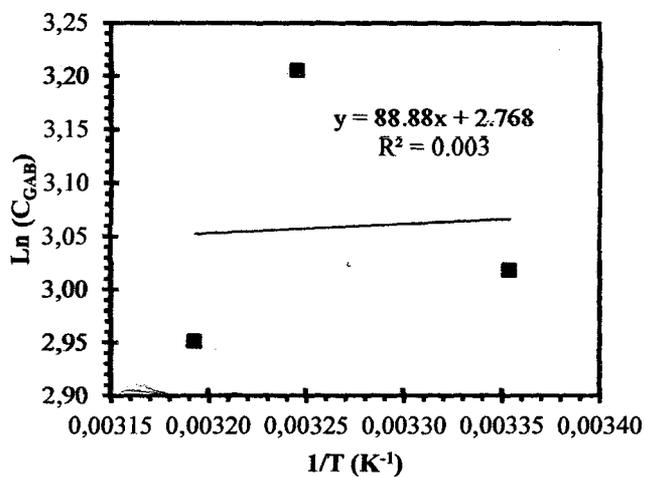
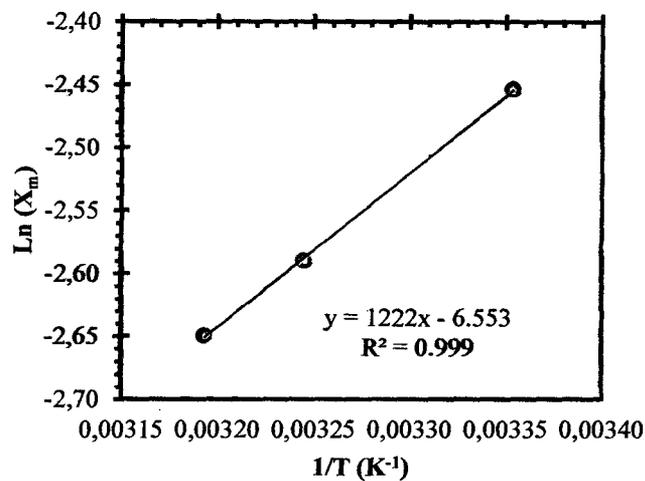


Figura 24. Curvas de relación entre el logaritmo natural de  $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $K_{GAB}$  versus el inverso de la temperatura  $1/T$ , para el cálculo de la  $E_a$ .

Fuente: Elaboración propia (2011).

## ANEXO 5. FOTOGRAFÍAS DEL ESTUDIO DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DEL AJÍ (*Capsicum annum* L.) SECO.

### 5.1. Acondicionamiento del material de estudio.



Figura 25. Aji "ojito de pescado" (*Capsicum annum* L.)

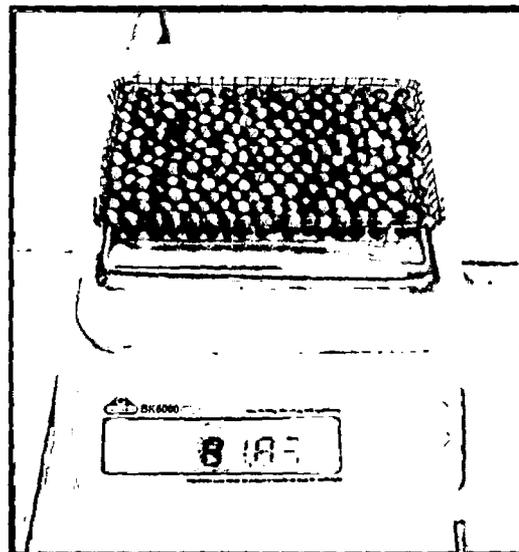


Figura 26. Pesado del aji antes del proceso de secado.

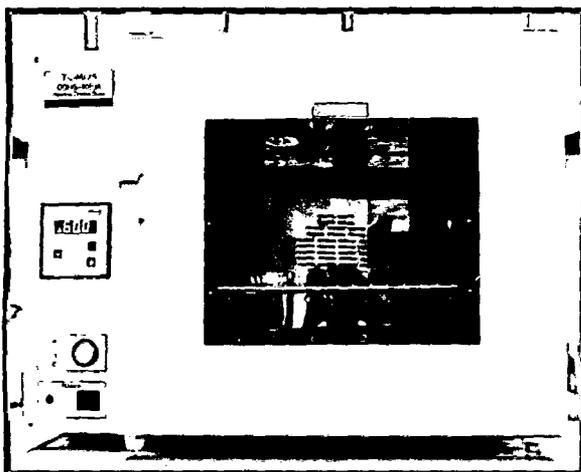


Figura 27. Estufa con circulación de aire utilizado para el secado.

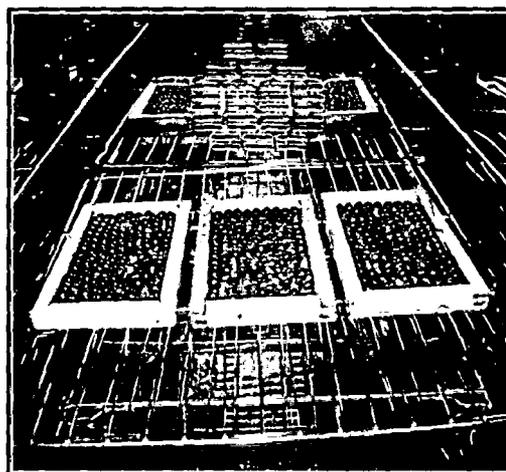


Figura 28. Proceso de secado del aji.



Figura 29. Pesado del ají durante el secado.

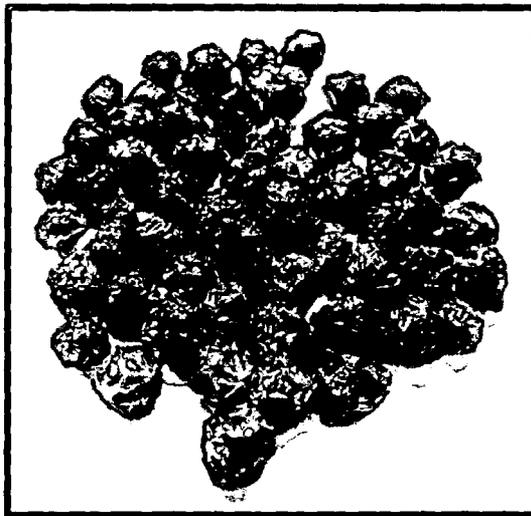


Figura 30. Muestras secas de ají (*Capsicum annuum* L.).

## 5.2. Proceso de determinación experimental de las isotermas de adsorción del ají (*Capsicum annuum* L.) seco.

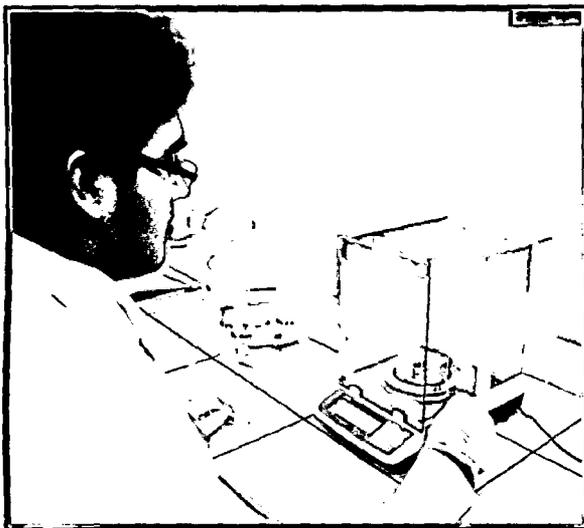


Figura 31. Pesado inicial de las muestras secas de ají.

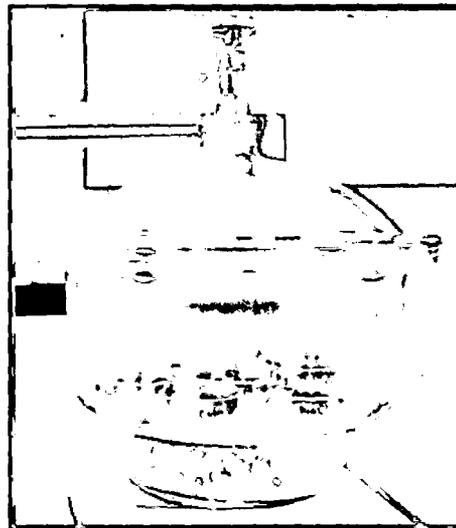


Figura 32. Campana desecadora conteniendo las muestras secas de ají ya pesadas.

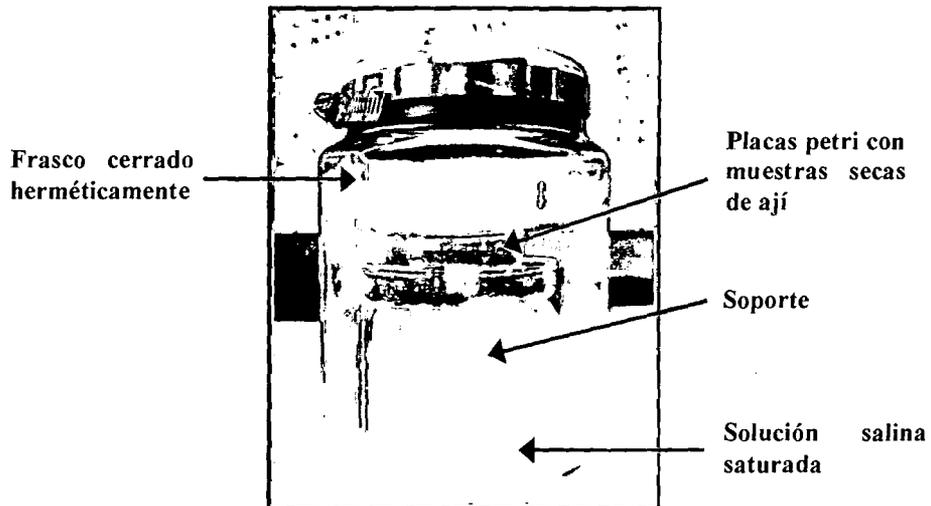


Figura 33. Detalles del frasco cerrado herméticamente conteniendo las muestras secas de ají.

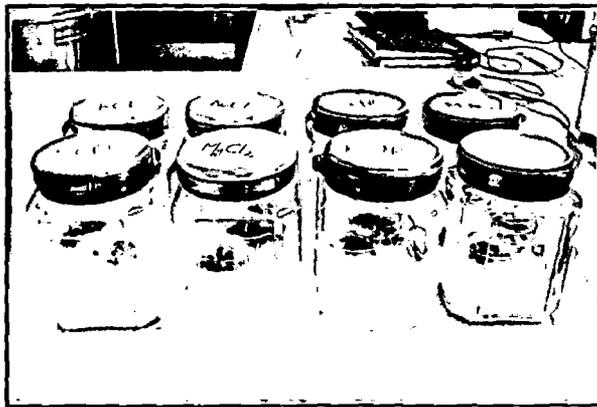


Figura 34. Muestras secas de ají colocadas en todos los frascos con diferentes soluciones salinas saturadas.

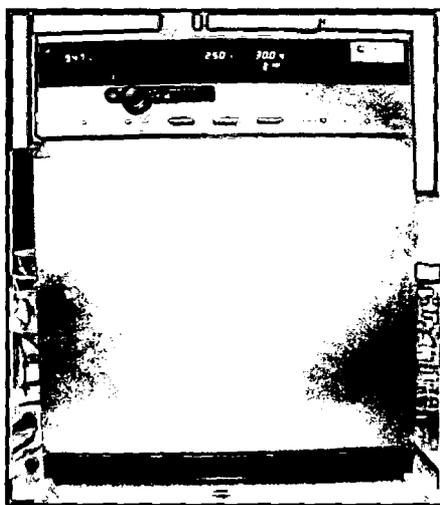


Figura 35. Estufa utilizada para la generación de temperatura constante.

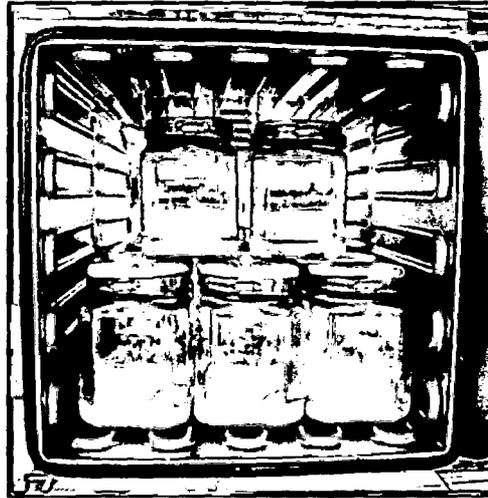


Figura 36. Frascos colocados en la estufa a una determinada temperatura (constante).



Figura 37. Retirado de las muestras secas de aji de las diferentes humedades relativas para su posterior pesado.

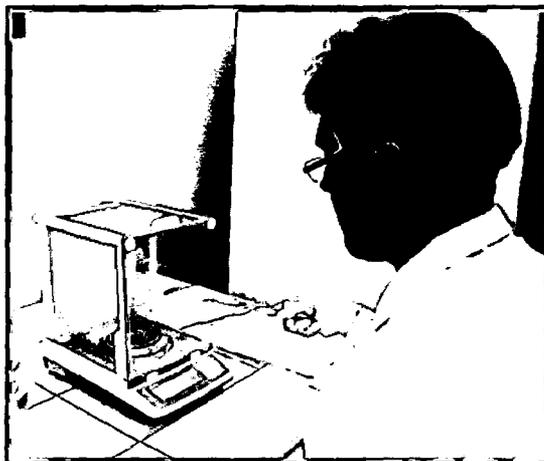


Figura 38. Pesado periódico de las muestras secas hasta alcanzar el equilibrio.

**ANEXO 6. COSTO DE REALIZACIÓN DE LA TESIS: DETERMINACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DEL AJÍ (*Capsicum annuum* L.) SECO.**

Tabla 27. Costos directos e indirectos

Especificaciones	Unidad de medida	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
<b>1. Costos directos</b>				<b>1413.6</b>
<b>a. Materia prima</b>				
Ají	kg	5	10	50
<b>b. Reactivos</b>				
Cloruro de Litio	kg	1	300	300
Acetato de Potasio	kg	1	340.6	340.6
Cloruro de Magnesio	kg	1	91.4	91.4
Carbonato de Potasio	kg	1	157.9	157.9
Nitrato de Magnesio	kg	1	99.7	99.7
Nitrato de Sodio	kg	1	120	120
Cloruro de Sodio	kg	1	120	120
Cloruro de Potasio	kg	1	134	134
<b>2. Costos indirectos</b>				<b>56.544</b>
<b>a. Imprevistos (el 4% de 1)</b>	%	4		56.544
<b>Sub Total: Costos directos</b>				<b>1413.6</b>
<b>Sub total: costos indirectos</b>				<b>56.544</b>
<b>Total</b>				<b>1470.144</b>

Fuente: Elaboración propia (2011).

Tabla 28. Servicios adquiridos

Especificaciones	Unidad de medida	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Internet	Hora	100	2	200
Anillado	Unidad	5	4	20
Estancia y Alimentación	-	-	-	500
Análisis fisicoquímico	Unidad	1	80	80
Pasaje (Bus)	Pasaje	6	40	240
Transporte de taxi	Carrera	10	3	30
<b>Total</b>				<b>1070</b>

Fuente: Elaboración propia (2011).

Tabla 29. Bienes adquiridos

<b>Especificaciones</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (S/.)</b>	<b>Costo total (S/.)</b>
Cartuchos de impresión	Unidad	4	30	120
Papel bond A4	Paquete	4	14	56
Cuaderno de apuntes	Unidad	2	4	8
Lápiz	Unidad	4	0.5	2
Lapicero	Unidad	4	1	4
Frascos de vidrio	Unidad	3	12	36
Abrazaderas	Unidad	8	5	40
Lapicero indeleble	Unidad	2	3.5	7
Tapers	Unidad	8	2.5	20
Papel aluminio	Unidad	1	10	10
Tesis (copia)	Copias	90	0.08	7.2
Libros (copia)	Copias	70	0.08	5.6
Fotocopias	Unidad	228	0.08	18.24
Tarjetas telefónicas	Unidad	4	10	40
Folder manila	Unidad	4	0.8	3.2
Gasolina	Galón	5	10.8	54
<b>Total</b>				<b>431.24</b>

Fuente: Elaboración propia (2011).

Tabla 30. Costo total de la Tesis

<b>Especificaciones</b>	<b>Costos totales</b>
Total costos directos e indirectos	1470.144
Total costo servicios adquiridos	1070
Total costos bienes adquiridos	431.24
<b>TOTAL (TESIS)</b>	<b>2971.384</b>

Fuente: Elaboración propia (2011).