

ESTUDIO DE LAS ISOTERMAS DE DESORCIÓN DEL JENGIBRE (*Zingiber officinale*)

Mari Medina V.*

Oscar Mendieta T.*

RESUMEN

Para datos experimentales de humedad de equilibrio en desorción del jengibre, determinados entre 10 y 80% de humedad relativa, fueron evaluados 12 modelos matemáticos de isotermas a 278 K, 298 K y 318 K. La ecuación de D'arcy-Watt presentó el mejor grado de ajuste con coeficientes de determinación (R^2) de 0,9999 para las tres temperaturas mencionadas. El cambio de energía libre y calor isotérico de desorción disminuyeron con el incremento en el contenido de humedad. La razón de calor latente de vaporización del agua en jengibre a calor latente de vaporización del agua libre decreció continuamente desde 1,5269 hasta 1,0446 en el rango de contenido de humedad de 6 a 18%, y puede ser representada por un polinomio de tercer grado con un coeficiente de correlación de 0,9994. Los valores obtenidos pueden ser utilizados para el diseño y control operacional del proceso de secado de este producto agrícola.

Palabras claves: Jengibre, desorción, isotermas.

1. INTRODUCCION

El jengibre es una especie de alto valor económico, muy conocida en la selva peruana, cuya producción puede ser incentivada en la región San Martín pues cuenta con tierras aptas para este cultivo; siendo una de las principales formas de conservación de este producto agrícola, el secado o deshidratación.

* Facultad de Ingeniería Agroindustrial - Universidad Nacional de San Martín. Casilla

El contenido de humedad de equilibrio es una importante propiedad de los materiales que tiene un impacto significativo en el manipuleo, procesamiento y almacenamiento de todos los materiales higroscópicos, Hutchinson, D y Otten, L. (1984). Se define contenido de humedad de equilibrio como el contenido de humedad del material después de haber sido expuesto a un determinado ambiente por un período muy largo de tiempo. El mecanismo que controla este fenómeno está gobernado por la presión de vapor de agua. Una representación gráfica de contenido de humedad de equilibrio del material versus humedad relativa del ambiente es conocida comúnmente como isoterma de adsorción o desorción, Shepherd, H. y Bhardwaj, R. (1986).

Numerosas investigaciones han sido efectuadas para determinar el contenido de humedad de equilibrio de una gran variedad de productos higroscópicos. Diversas ecuaciones teóricas, semiteóricas y empíricas han sido desarrolladas y utilizadas en el análisis de datos de contenido de humedad de equilibrio, Hutchinson, D y Otten, L. (1984). Boquet, Iglesias y Chirife (1978) presentaron una extensa revisión de ecuaciones que describen las isotermas de desorción aplicables a productos alimentarios.

Los objetivos del presente estudio fueron:

- Evaluar diferentes ecuaciones de isotermas de desorción para valores experimentales de humedad de equilibrio y humedad relativa obtenidos en la desorción del jengibre.
- Determinar el cambio de energía libre, calor isotérico de desorción y calor latente de vaporización para jengibre.

2. MATERIALES Y METODOS

Los valores experimentales de humedad de equilibrio y humedad relativa para la desorción del jengibre a 278 K, 298 K y 318 K fueron tomados de Sinicio y Roa (1979).

Las ecuaciones de isotermas empleadas se presentan en el Cuadro 1. Estas ecuaciones fueron ajustadas a los valores experimentales mediante análisis de regresión, lineal o no lineal según el caso, utilizando el paquete estadístico Statgraf 4.0.

El grado de concordancia entre los valores experimentales y los precedidos por las diferentes ecuaciones fue verificado mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio relativo (RMS%), calculado este último según la ecuación:

Cuadro N° 1

Modelos matemáticos de isotermas de desorción

N°	NOMBRE DEL MODELO	ECUACION
(1)	Smith	$M = K_1 - K_2 \ln (1 - A_w)$
(2)	Bradley	$M = \ln: \ln(1/A_w)/K_2: \ln K_1:$
(3)	Oswin	$M = K_1: A_w/(1-A_w):^{k_2}$
(4)	Caurie	$M = K_1 \text{ EXP } (-K_2 A_w)$
(5)	Harkins-Jura	$M = : (K_2 - \ln A_w)/K_1:^{-0.5}$
(6)	Bet	$\frac{A_w}{(1 - A_w) M} = \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{K_2 - 1}{K_1 - K_2} w$
(7)	Chung-Pfost	$M = \frac{-1}{K_2} \ln \frac{T \ln A_w}{-K_1}$
(8)	Halsey	$M = \frac{\text{EXP } K_1 (1/K_2) - \ln A_w}{\ln (1-A_w) (1/K_2)}$
(9)	Henderson-Thompson	$M = \frac{-K_1 - 1}{K_2} \ln \frac{\ln A_w}{-K_1}$
(10)	Chen-Clayton	$M = \frac{-K_1 - 1}{K_2} \ln \frac{\ln A_w}{-K_1}$
(11)	Gab	$\frac{A_w}{A_w^2} = \frac{1}{K_1 K_2 K_3} + \frac{K_1 (K_2 - 2)}{K_1 K_2 K_3} \frac{K_2^2 - K_1 K_2^2}{A_w + K_1 K_2 K_3}$
(12)	D'arcy-Watt	$M = \frac{K_1 K_2 A_w}{1 + K_1 A_w} + \frac{K_3 K_4 A_w}{1 - K_3 A_w} + K_5 A_w$

$$\text{RMS\%} = 100 \sqrt{\frac{(\text{Meq. exp.} - \text{Meq. sim.}) / \text{Meq. exp.}}{N}} \quad (13)$$

en donde N es el número de datos.

La presión de vapor de saturación del agua libre (Pvs) para cada temperatura fue determinada con la ecuación (14) (Pvs en N/m²) :

$$\text{Pvs} = \text{EXP} (60,43 - \frac{6\ 8\ 34,27}{T + 273} - 5,17 \text{ Ln} (T + 273)) \quad (14)$$

El valor de la presión de vapor (Pv) para cada temperatura, fue calculado según la ecuación:

$$\text{Pv} = \text{Pvs} * \text{HR} \quad (15)$$

La humedad relativa para la ecuación anterior fue calculada a través de la ecuación que describió mejor los puntos experimentales para valores de humedad de equilibrio comprendidos entre 6 y 18% (b.h.).

El cambio de energía libre para las diferentes temperaturas consideradas fue obtenido de la ecuación :

$$\Delta F = R T \text{ Ln}(\text{Pv}/\text{Pvs}) \quad (16)$$

Las constantes de la ecuación (17) que relaciona ΔF y contenido de humedad fueron determinadas mediante regresión lineal (mínimos cuadrados) para las tres temperaturas consideradas en el estudio.

$$-\Delta F = -K_1 \text{ EXP} (-K_2 M) \quad (17)$$

Para el cálculo del calor isotérico de desorción se utilizó la ecuación:

$$-\Delta H = R \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_1} \text{ Ln} \frac{P_2}{P_1} \quad (18)$$

y para el calor neto de desorción :

$$q = \lambda H - 2 \quad (19)$$

Mediante regresión lineal se determinó la razón calor latente de vaporización del agua en jengibre a calor latente de vaporización del agua libre (L/L_s) de la ecuación de Othmer (5):

$$\ln(P_v) = \frac{L}{L_s} \ln(P_{vs}) + C \quad (20)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Las constantes de los doce modelos matemáticos evaluados se presentan en el Cuadro 2. De las ecuaciones utilizadas la que mejor reprodujo los valores experimentales fue la ecuación de D'arcy-Watt, con valores del coeficiente de determinación (R^2) de 0,9999 para las tres temperaturas de trabajo. En los tres casos el error medio relativo (RM-S%) fue inferior al 1%. Según Saravacos et al (1986) esta ecuación puede ser aplicada para actividades de agua comprendidas entre 0,10 y 0,90; sin embargo la necesidad de estimar cinco parámetros puede hacer a este modelo menos atractivo para su aplicación en alimentos. Los valores experimentales y las curvas ajustadas con esta ecuación se presentan en la Figura 1.

FIG. 1 ISOTERMAS DE DESORCION DE JENGIBRE

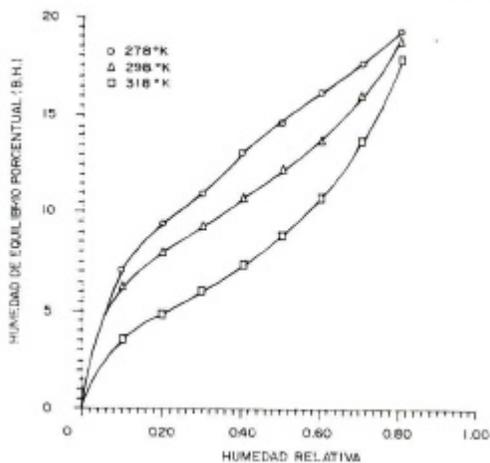
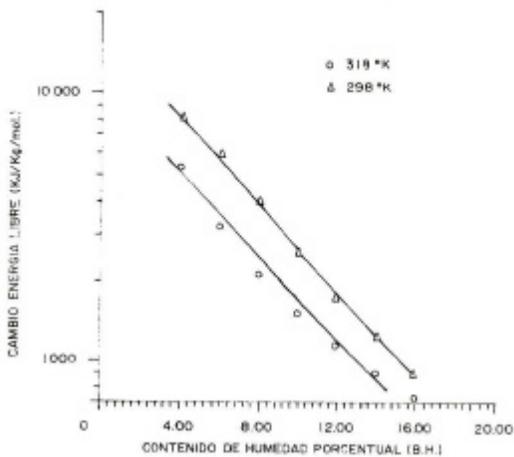


FIG. 2 CAMBIO EN ENERGIA LIBRE DE DESORCION PARA JENGIBRE



Cuadro 2
Valores de las Constantes de las Isotermas Evaluadas para Jengibre

Ecuación	Tem (°K)	----- Constantes -----					Coef. Det. R ²	RMS%
		K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅		
Smith	278	8,0679	7,9378				0,9946	10,4290
	298	6,2263	8,2298				0,9992	4,4294
	318	2,5401	9,4154				0,9995	2,6807
Bradley	278	0,9306	9,6033				0,9854	3,9936
	298	0,8321	6,9344				0,9960	2,6436
	318	0,8492	3,4072				0,9673	13,3859
Oswin	278	14,1046	0,2631				0,9984	5,1026
	298	12,3475	0,3132				0,9999	1,2021
	318	9,0946	0,4859				0,9994	4,8785
Caurie	278	7,5534	-1,2301				0,9974	7,9418
	298	5,8894	-1,4605				0,9996	2,8665
	318	2,9206	-2,2473				0,9991	3,7945
Harkins- Jura	278	180,8967	0,2256				0,9977	7,5402
	298	113,1693	0,0826				0,9997	3,0766
	318	45,2635	-0,0888				0,9972	11,0168
Bet	278	5,2705	-4,92E13				0,9277	26,9574
	298	4,4680	6,61E05				0,9537	24,7214
	318	3,9307	248,7522				0,9924	10,3420
Bett**	278	7,8518	52,1068				0,9715	4,0014
	298	6,4564	102,4204				0,9803	3,0981
	318	4,6856	19,9306				0,9984	1,0489
Chung- Pfof	278	2669,46	0,1856				0,9854	4,1125
	298	2066,02	0,1838				0,9960	2,6471
	318	1083,42	0,1635				0,9673	13,3883
Halsey	278	5,7944	2,3639				0,9363	8,3050
	298	4,9510	2,1500				0,9893	3,5848
	318	2,7601	1,4499				0,9960	3,2456
Henderson- Thompson	278	5,59E-04	2,6637				0,9982	1,3756
	298	1,18E-03	2,5071				0,9848	4,1656
	318	0,0147	1,7068				0,9731	8,1213
Chen- Clayton	278	9,6032	0,1856				0,9854	3,9935
	298	6,9344	0,1838				0,9960	2,6436
	318	3,4072	0,1634				0,9673	13,3859
Gab	278	12,3387	20,5052	0,5147			0,9996	2,0379
	298	8,2319	31,7377	0,7230			0,9999	0,8097
	318	5,3007	14,9318	0,8935			0,9999	1,2841
D'arcy- Watt	278	29,0485	7,4703	-0,0541	1,0503	15,4157	0,9999	0,7727
	298	46,6498	6,4633	0,9032	2,3816	8,2370	0,9999	0,4584
	318	14,3327	5,2686	0,8199	8,1685	-2,9639	0,9999	0,7303

**

Para valores de Aw entre 0,1-0,5

La ecuación Gab presentó el segundo mejor grado de ajuste para las tres temperaturas consideradas con valores del error medio relativo iguales o inferiores al 2%. Este modelo de adsorción semiteórico ha sido considerado como el mejor modelo para muchos materiales alimenticios, Mok, et al. (1990). Las demás ecuaciones evaluadas presentaron menor grado de ajuste.

El cambio de energía libre viene a ser la energía requerida para transferir moléculas del estado de vapor a la superficie del sólido o de la superficie del sólido al estado de vapor, y puede ser considerado como una medida del trabajo efectuado por el sistema al llevarse a cabo los procesos de adsorción y desorción. El cambio de energía libre decreció continuamente con el incremento en el contenido de humedad.

La relación entre energía libre y contenido de humedad, obtenida fue:

para 278 K:

$$-?F = 321\ 033 \times 10^3 \text{ EXP } (-0,1685 M) \quad (21)$$

$$R = -0,995$$

para 298 K:

$$-?F = 1\ 391\ 696 \times 10^3 \text{ EXP } (-0,1823 M) \quad (22)$$

$$R = -0,998$$

para 298 :

$$-?F = 1\ 439\ 779 \times 10^3 \text{ EXP } (-0,1760 M) \quad (23)$$

$$R = -0,989$$

El ploteo de las ecuaciones (22) y (23) es mostrado en la Figura 2.

El calor de desorción es la cantidad de calor requeridos para la migración de humedad cuando ésta desorbe como vapor. Shepherd y Bhardwaj (1986) indican que es una medida del calor o energía que debe ser adicionada al adsorber gas para romper la fuerza intermolecular existente entre las moléculas de vapor de agua y la superficie del adsorbente. En el Cuadro 3 se presentan los valores de calor isotérico y calor neto de desorción calculados con las ecuaciones (18) y (19). Puede apreciarse que el calor de desorción decrece con el aumento en el contenido de humedad desde 90,62 hasta 45,21 MJ/kg mol.

Cuadro 3

Calor isotérico de desorción y calor neto de desorción para jengibre

Humedad de equilibrio (% b.h.)	Calor isotérico de desorción (MJ/kg mol)		Calor neto de desorción (MJ/kg mol)	
	288 K	308 K	288 K	308 K
6,0	47,8948	90,6157	46,7617	87,9778
8,0	56,8171	76,7162	55,6840	74,0783
10,0	60,3468	63,0273	59,2137	60,3894
12,0	57,8286	54,8806	56,6955	52,2427
14,0	53,5562	50,1675	52,4231	47,5296
16,0	49,7703	47,2090	48,6372	44,5711
18,0	46,8763	45,2055	45,7432	42,5676

El ploteo de la ecuación de Othmer (20) para contenidos de humedad constantes comprendidos entre 6 y 18% dio un juego de líneas rectas (isóteras) cuyas pendientes corresponden a la razón L/Ls. El coeficiente de correlación de las isóteras en el ploteo de la ecuación de Othmer fue superior al 0,995. La pendiente de las isóteras decreció en forma continua con el incremento en el contenido de humedad como se muestra en la Figura 3.

Para la razón L/Ls (pendientes de Othmer) y el contenido de humedad se obtuvo una relación dada por un polinomio de tercer grado de la forma siguiente:

$$\frac{L}{L_s} = 1,25372 + 0,11708 M - 0,01427 M^2 + 0,000396 M^3$$

$$R = 0,9994 \quad (24)$$

El ploteo de la ecuación (24) es mostrado en la Figura 4.

Valores de calor latente de vaporización para contenidos de humedad comprendidos entre 6 y 18%, a las temperaturas de 278 K y 318 K, se presentan en el Cuadro 4. Puede observarse que el calor latente de vaporización del agua en jengibre decrece continuamente con el incremento en el contenido de humedad y la razón L/Ls tiende a la unidad conforme el contenido de humedad del jengibre se incrementa.

FIG. 3 RECTAS DE OTHMER PARA JENGIBRE

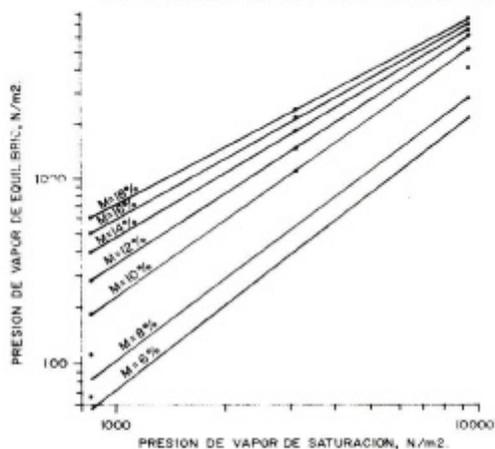
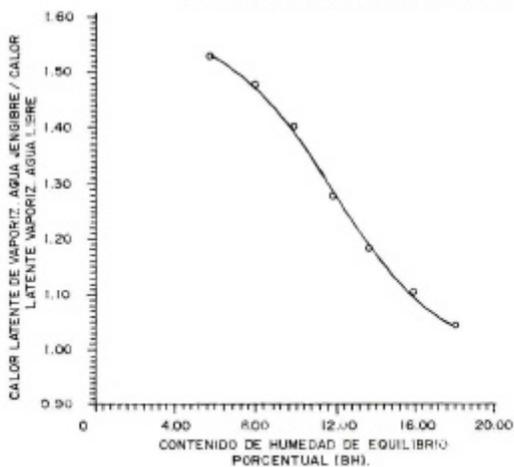


FIG. 4 VARIACION DEL CALOR LATENTE DE VAPORIZACION DEL AGUA DE JENGIBRE



Cuadro 4**Calor latente de vaporización del agua de jengibre**

Humedad de equilibrio (% b.h.)	Calor latente de vaporización (KJ/kg)			L/Ls
	278 K	298 K	318 K	
6,0	3 801,60	3 729,45	3 656,77	1,5269
8,0	3 720,68	3 650,07	3 578,94	1,4944
10,0	3 478,68	3 412,66	3 346,15	1,3972
12,0	3 192,11	3 131,53	3 070,50	1,2821
14,0	2 939,40	2 883,62	2 827,42	1,1806
16,0	2 746,69	2 694,57	2 642,05	1,1032
18,0	2 600,79	2 551,44	2 501,71	1,0446
Agua	2 489,75	2 442,50	2 394,90	1,0000

4. CONCLUSIONES

1. La ecuación de D'arcy-Watt describió las isotermas de desorción del jengibre con un alto coeficiente de correlación y mínimo valor del error medio relativo, sobre todo el rango de temperatura y humedad considerado.
2. El calor isotérico de desorción, el calor neto de desorción y el cambio de energía libre decrecieron en forma continua con el incremento del contenido de humedad.
3. El calor latente de vaporización del agua en jengibre decrece con el incremento en el contenido de humedad y un polinomio de tercer grado correlaciona la razón L/Ls con el contenido de humedad.

5. NOMENCLATURA UTILIZADA

Símbolo	Definición	Unidades
?H	Calor isotérico de desorción.	MJ/kg mol
HR	Humedad relativa, decimal.	
K ₁ , K ₂ , K ₃ , K ₄ , K ₅	Constantes de las ecuaciones de isotermas.	
L	Calor latente de vaporización del agua en jengibre.	kJ/k
L _s	Calor latente de vaporización del agua libre.	kJ/kg
M	Contenido de humedad del jengibre, porcentaje en base húmeda	
Meq. exp.	Contenido de humedad experimental, porcentaje en base húmeda.	
Meq. sim.	Contenido de humedad calculado, porcentaje en base húmeda.	
P _v	Presión de vapor del agua en jengibre.	N/m ²
P _{vs}	Presión de vapor de saturación.	N/m ²
P ₁ , P ₂	Presiones de vapor de equilibrio a temperaturas T ₁ y T ₂ , respectivamente.	N/m ²
R	Constante universal de los gases.	J/kg mol K
T	Temperatura.	K
T ₁ , T ₂	Temperaturas de isotermas adyacentes.	K
?F	Cambio en energía libre.	kJ/kg mol
?	Calor latente de vaporización del agua a una temperatura especificada	kJ/kg

6. BIBLIOGRAFIA

- BOQUET, R.; CHIRIFE, J. and IGLESIAS, H. 1978. "Equations for fitting water sorption isotherms of foods: II. Evaluation of various two parameter models", en *J. Fd. Technol.* 13:319-327.
- HUTCHINSON, D. y OTTEN, L. 1984. "Equilibrium Moisture Content of White Beans", en: *Cereal Chemistry* 61(2): 155-158.
- MOK, C. y HETTIARACHCHY, N. 1990. "Moisture Sorption Characteristics of Ground Sunflower Nutemeat and its Products", en *J. Fd. Sci.* 55(3): 786-789.
- ROSSI, S.; FIOREZE, R.; DE SOUZA, V. y RAMALHO, H. 1981. "Curvas e Equações de Equilibrio Higroscópico para 15 Produtos Agrícolas", en *Rev. braz. de armazen., Vicosa*, 6(2):5-10.
- SARAVACOS, G.; TSIOURVAS, D. y TSAMI, E. 1986. "Effect of Temperature on the water adsorption isotherms of Sultana Raisins", en *J. Fd. Sci.* 51(2): 381-383, 387.
- SHEPHERD, H. y BHARDWAJ, R. 1986. "A Study of the desorption isotherms of rewetted pigeon pea Type-17", en *J. Fd Sci.* 51(3): 595-598.
- SINICIO, R. y ROA, G. 1979. "Curvas de Teor de Equilibrio e Calor latente de Vaporização para Castanhas de Caju e Raspas de Mandioca", en: *Rev. Braz. de armazen.; Viçosa*, 4(2): 45-55.