

ISOTERMAS DE DESORCIÓN DE HUMEDAD EN PITAHAYA AMARILLA (*Selenicereus megalanthus*)

MOISTURE DESORPTION ISOTHERMS IN YELLOW PITAHAYA (*Selenicereus megalanthus*)

ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE UMIDADE EM PITAIAIÁS AMARELO (*Selenicereus megalanthus*)

ALFREDO A. AYALA-APONTE¹, LILIANA SERNA COCK², GLORIA RODRIGUEZ³

RESUMEN

Se determinaron las isotermas de desorción de humedad en pitahaya amarilla a 15, 25 y 35°C mediante el método gravimétrico en el intervalo de actividad de agua entre 0.111 y 0.901. Los valores experimentales de desorción se ajustaron mediante los modelos de GAB, Henderson, Smith, Oswin y Chung y Fost, usualmente usados en alimentos. El calor isostérico de desorción (Q_{st}) se determinó mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron. Los resultados mostraron que las isotermas fueron de tipo III. El contenido de humedad de equilibrio (CHE) presentó dependencia con la temperatura, esta disminuyó con el aumento de la temperatura para un valor constante de actividad de agua. El modelo GAB fue el de mejor ajuste de los valores experimentales. El Q_{st} disminuyó con el aumento del CHE, desde 61.43 hasta 45.11 kJ/mol para humedades de 0.08 hasta 0.56 (g agua/g ms) respectivamente.

Recibido para evaluación: 17/11/2011. Aprobado para publicación: 20/06/2012

- 1 Doctor en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Profesor Escuela de Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle. Cali-Colombia
- 2 Doctor en Ingeniería de Alimentos. Profesora Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia-Palmira.
- 3 Msc en Ingeniería de Alimentos. Profesora Universidad San Buenaventura-Cali.

Correspondencia: alfayala04@gmail.com

ABSTRACT

Moisture desorption isotherms for yellow pitahaya fruits were studied at 15, 25, and 35 °C using the gravimetric method for a 0.111-0.901 water activity range. Experimental values were adjusted by using the GAB, Henderson, Smith, Oswin y Chung y Fost models. The isosteric heat of adsorption (Qst) was determined using the Clausius-Clapeyron equation. The results showed that yellow pitahaya fruits exhibit type III adsorption isotherms and that the equilibrium moisture content (EMC) is temperature-dependent. For the same water activity value, the EMC decreased when temperature increased. The GAB model presented the best fit to the experimental values. The Qst dropped from 61.43 a 45.11 kJ/mol when the EMC increased from 0.08 to 0.56 g water/g dry matter, respectively.

RESUMO

Se determinaram as isotermas de dessorção de humidade da pitaiaiás amarela, 15, 25 y 35°C utilizando-se o método estático gravimétrico numa faixa de atividade de água entre 0.111 e 0.90. Os valores experimentais de adsorção foram ajustados pelos modelos de GAB, Henderson, Smith, Oswin y Chung y Fost, O calor isostérico de adsorção (Qst) foi determinado pela equação de Clausius-Clapeyron. Os resultados mostraram que as isotermas obtidas foram do tipo III. O teor de humidade de equilíbrio (CHE) apresentou dependência com a temperatura, diminuindo com o aumento desta a um valor constante de atividade de água. O modelo de GAB foi o que apresentou o melhor ajuste dos valores experimentais. O Qst diminuiu com o aumento de CHE, obtendo-se um máximo e um mínimo entre 61.43 a 45.11 kJ / mol de humidade entre 0.08 e 0.56 (g de água / g bs), respectivamente.

PALABRAS CLAVES:

Cactaceae, modelos matemáticos, Calor isostérico de sorción.

KEY WORDS:

Cactaceae, mathematical models, isosteric heat of sorption.

PALAVRAS-CHAVE:

Cactaceae, modelos matemáticos, Calor isostérico de sorção

INTRODUCCIÓN

La pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*) es un fruto tropical perteneciente a la familia de las cactáceas. Es exótico y apetecido no sólo por su agradable sabor sino también por su exuberante color y forma, y ha sido considerado en Colombia como uno de los frutos promisorios de exportación [1]. Colombia e Israel son los mayores productores del mundo seguido de otros países de América central y de Asia. La exportación de la fruta en Colombia va en aumento no solamente por la apertura de nuevos mercados en Europa y en algunos países del medio oriente, sino por las reconocidas propiedades funcionales y medicinales del fruto [2]. La Pitahaya es fuente de glucosa, fructosa, fibra dietética, vitaminas y minerales [3,4].

Son escasas las investigaciones sobre procesamiento y conservación de pitahaya amarilla, destacándose desde el 2009 procesos de deshidratación osmótica [1,5] y de liofilización [6]. La aplicación de estos procesos en

pitahaya reduce significativamente la actividad de agua prolongando su vida de anaquel en el almacenamiento. Por consiguiente el conocimiento de la actividad de agua es importante en los procesos de deshidratación y en el almacenamiento de alimentos.

La a_w es la fracción de contenido de humedad de un producto que está disponible para el crecimiento de microorganismos y para llevar a cabo diversas reacciones químicas que afectan a su estabilidad. El conocimiento de la relación de la a_w y el contenido de humedad de equilibrio (CHE) de los materiales alimenticios es importante para predecir los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que ocurren durante el almacenamiento y transformación [7]. Esta relación entre la a_w y el CHE, a una temperatura constante, es llamada isoterma de sorción de vapor de agua, que hace referencia a procesos de desorción (deshidratación) o de adsorción (hidratación o rehidratación). Las isotermas de sorción en los alimentos tienen su aplicación en la modelación de procesos de secado, diseño y optimización de equipos de secado, predicción de la vida útil, selección de empaque, entre otros [8].

En la literatura científica se han propuesto diversos modelos matemáticos para describir matemáticamente las isotermas de sorción, como los modelos teóricos de GAB y BET [9,10] y los modelos empíricos o semi empíricos como el de Smith, Oswin, entre otros [11]. Una ventaja de las ecuaciones de BET y GAB es que predicen el contenido de humedad de la monocapa (x_0), que se define como la cantidad de agua (g agua/g ms) que está fuertemente unida en todos los sitios activos de la fase sólida adsorbente del alimento y es considerada como el valor en la cual el alimento es estable en el almacenamiento [7].

El calor isostérico de sorción (Q_{st}) es una propiedad termodinámica que indica una medida de la fuerza de enlace o de unión entre las moléculas de agua y la superficie del sustrato del alimento, y es mayor que el calor latente de vaporización del agua pura a una temperatura dada [12]. De acuerdo a Rizvi [13], el Q_{st} es un parámetro de mucha utilidad en los procesos de adsorción y desorción de agua en alimentos; en los procesos de desorción representa la energía requerida para romper las fuerzas de enlace entre las moléculas de vapor de agua y la superficie del adsorbente,

y en los procesos de adsorción corresponde a la energía necesaria para que ocurra lo contrario. Otros investigadores [14], manifiestan que el conocimiento de Q_{st} a un CHE constante en procesos de sorción, proporciona información sobre el estado del agua en su interacción con la fase sólida del alimento y, por tanto, es una medida de la estabilidad física, química y microbiológica de los alimentos a unas condiciones determinadas en el almacenamiento.

El objetivo de este trabajo fue determinar experimentalmente las isotermas de desorción de vapor de agua en muestras frescas de pitahaya amarilla a 15, 25 y 35 °C, modelar los valores experimentales mediante diferentes ecuaciones y determinar el calor isostérico de desorción a diferentes CHE.

MÉTODO

Materia prima

Se emplearon pitahayas amarillas con grado de madurez 3 (16-18 °Brix), de acuerdo a la NTC 3554 [1996]. Las frutas fueron obtenidas de fincas productoras localizadas en el norte del Departamento del Valle del Cauca (Colombia), pertenecientes a la Asociación de productores pitayeros (ASOPPITAYA).

Procedimiento experimental

Se determinaron las isotermas de desorción a 15, 25 y 35 °C mediante el método estático gravimétrico de soluciones salinas saturadas recomendado por el proyecto COST 90 [15]. Se emplearon ocho soluciones saturadas (LiCl, CH₃COOK, MgCl₂, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, NaCl, KCl y KNO₃) con actividades de agua que variaron entre 0.123 y 0.928 a diferentes temperaturas, de acuerdo a lo reportado por Greespan [1996] [16]. Cada solución saturada (35 ml) estaba contenida en un recipiente de vidrio, herméticamente cerrado, de 6 cm de altura y 5 cm de diámetro. Se utilizaron muestras de pitahaya amarilla liofilizada con dimensiones de 15 mm de largo, 5 mm de ancho y 5 mm de altura con un peso aproximado 1.201 ± 0.01 g. Para evitar la contaminación microbiana se colocó Tymol puro en los recipientes que contenían soluciones salinas con a_w superior a 0.65. Posteriormente los recipientes con las muestras de pitahaya se colocaron en una cámara

ambiental (Hotpack, USA) a las diferentes temperaturas de trabajo. Para asegurar el equilibrio de las muestras con las soluciones salinas, cada tres días se pesaron las muestras hasta obtener peso constante (± 0.001) (balanza analítica de precisión ± 0.0001 g., Metler, Suiza). El tiempo del pesaje periódico de las muestras fue inferior a 1 min para evitar cualquier efecto sobre los resultados. Las muestras en equilibrio fueron retiradas de los recipientes entre 18 y 25 días. El CHE de las muestras se determinó por el método de estufa [17].

Los experimentos de desorción para cada temperatura se realizaron por triplicado. Se evaluó el efecto de temperatura sobre el contenido de humedad de equilibrio mediante el análisis de la varianza (ANOVA) a un nivel de significancia del 95%, para ello se usó el programa estadístico SPSS 11.

Modelización de los valores experimentales mediante modelos de sorción

Se emplearon 5 ecuaciones matemáticas para modelar los valores experimentales del CHE, GAB, Henderson, Smith, Oswin y Chung y Fost (Cuadro 1). Estos modelos son ampliamente usados en la literatura científica para diversos alimentos [18,19]. Los parámetros de los modelos empleados se calcularon mediante una regresión no lineal, utilizando el software Minitab versión 15.1. El porcentaje de error medio relativo (MRE) y el coeficiente de correlación (r^2) se emplearon como criterios para determinar el modelo de mejor ajuste de los valores experimentales (Ec. 1). Un modelo de sorción se considera aceptable cuando presenta un MRE menor al 10 % [20] y un r^2 cercano a 1.

$$MRE = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{M_c - M_p}{M_c} \right| \quad (\text{Ec. 1})$$

donde M_c = valor experimental, M_p = valor predicho y N = número de muestras.

Calor isostérico de Sorción (Q_{st})

El Q_{st} , llamado también calor total de sorción o entalpía diferencial se determinó a partir de los valores experimentales evaluados en la ecuación de Clausius-Clayperon [21]. (Ec. 2).

$$\left[\frac{\partial h(a_w)}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right]_{CHE} = - \frac{Q_s - \lambda}{R} = - \frac{q_s}{R} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde q_{st} es el calor isostérico neto de sorción, R es la constante universal de los gases y λ es el calor latente de vaporización del agua pura, que se calculó para una temperatura fija de 25 °C correspondiente al promedio de 15, 25 y 35 °C. El q_{st} y se define como la diferencia entre Q_{st} y el calor latente de vaporización del agua pura.

Al graficar el $\ln(a_w)$ versus $1/T$ para diferentes valores de humedad se obtienen líneas rectas de cuya pendiente $-(Q_{st}-\lambda)/R$ se despeja Q_{st} . Para la obtención de las líneas rectas se predijeron distintos valores de a_w a diferentes niveles de CHE (entre 0.05 y 0.40 g agua/g m.s) empleando el modelo GAB.

RESULTADOS

Isotermas de desorción de agua

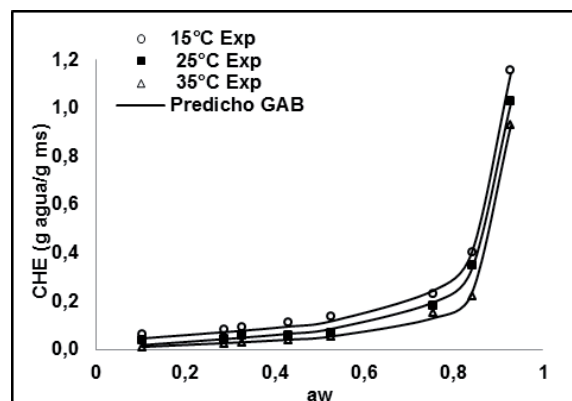
Las isotermas experimentales de desorción de las muestras de pitahaya a 15, 25 y 35 °C se muestran en la figura 1. El contenido de humedad inicial de las muestras de pitahaya fue de 0.815 ± 0.001 (g agua/g m.h). Las desviaciones estándar de los valores experimentales del CHE en las isotermas variaron entre 0.0018 y 0.0029. De acuerdo a la clasificación de Brunauer *et al.*, (1940), citado por Iguedjal *et al.* [11] las isotermas presentaron un comportamiento de tipo III, característico de alimentos ricos en componentes solubles como los azúcares, [22]. Este tipo de isotermas se han obtenido en otras frutas como en uvas y albaricoques [23] y Kiwi [24].

Puede notarse que a valores de a_w inferiores de 0.55, las isotermas presentaron relativamente bajos CHE, mientras que a valores superiores fueron altos. Algunos investigadores [25,26] explican este comportamiento, argumentan que en valores de a_w superiores a 0.55 se potencia el fenómeno de solubilización provocando un incremento importante del contenido de humedad. El análisis de la varianza (ANOVA) evidenció un efecto significativo ($p < 0.05$) de la a_w sobre el CHE; se observó

Cuadro 1. Ecuaciones empleadas para el ajuste de las isotermas de sorción de agua en pitahaya

<p>GAB</p> $CHE = \frac{x_0 * C * K * a_w}{(1 - k * a_w) * (1 + (c - 1) * k * a_w)}$ <p>X₀: contenido de humedad de la monocapa C: constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa. K: constante relacionada con el calor de adsorción de la multicapa</p>
<p>HENDERSON</p> $CHE = 0.0 \left(\frac{-\log(1 - a_w)}{0.01} \right)^{1/n}$ <p>f y n: constantes propias del modelo</p>
<p>SMITH</p> $CHE = k_1 - k_2 h (1 - a_w)$ <p>k₁ y k₂: parámetros del modelo que dependen del producto</p>
<p>OSWIN</p> $CHE = c_1 * \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^{c_2}$ <p>c₁ y c₂: constantes propias del modelo de sorción y características del producto</p>
<p>CHUNG Y FONT</p> $CHE = a + b h (-h a_w)$ <p>a y b: constantes del modelo</p>

Figura 1. Isotermas de desorción experimental y predicha con el modelo GAB de muestras de pitahaya a 15, 25 y 35 °C



en todas las isotermas que el CHE disminuyó conforme decreció el valor de la a_w . Este comportamiento es prácticamente común en el proceso de desorción y de adsorción de los alimentos. Asimismo, se evidenció un efecto estadísticamente significativo ($p < 0.05$) de la temperatura sobre el CHE, se observó una disminución del CHE con el incremento de la temperatura para un valor fijo de a_w , de otra manera puede decirse que con el incremento de la temperatura la a_w aumentó para un valor fijo de CHE. Estos resultados indican que la pitahaya fresca presenta menor capacidad de retención de agua a mayor temperatura para un valor fijo de a_w ; este comportamiento se ha evidenciado en otras frutas como en ciruela china [27], productos de uva (“pestil grape”) [18] y en otros alimentos [12] [28].

Mazza [29], argumenta que un incremento en la temperatura de sorción ocasiona cambios químicos y físicos en el producto, que pueden reducir el número de sitios activos donde se unen las moléculas de agua con la superficie del sólido del alimento. Otros investigadores [30], afirman que la dependencia entre el CHE y la temperatura de sorción tiene un efecto práctico en las reacciones químicas y microbiológicas asociadas con el deterioro del alimento.

Modelamiento de los valores experimentales de sorción

En la cuadro 2 se muestran los parámetros, el MRE y el r^2 de los modelos de sorción para las tres temperaturas (15, 25 y 35 °C). De acuerdo a los criterios de Lomauro *et al.* [20], el modelo GAB fue el de mejor ajuste con MRE que varió entre 5.76 y 7.89% y r^2 entre 0.991 y

Cuadro 2. Parámetros y criterios estadísticos de diferentes modelos de sorción en el ajuste de los valores experimentales de CHE en pitahaya liofilizada a tres temperaturas.

Modelo	Parámetros	Temperatura (°C)		
		15	25	35
GAB	x_0	0.061	0.040	0.028
	C	35.21	22.43	3.758
	K	1.021	1.036	1.045
	r^2	0.998	0.991	0.995
	MRE %	5.760	7.890	7.220
Hen-derson	A	1,780	1,788	1,804
	B	0,113	0,112	0,110
	r^2	0,924	0,955	0,907
	MRE %	68,380	67,05	75,00
Smith	C_1	-0,093	-0,126	-0,133
	C_2	0,380	0,353	0,314
	r^2	0,830	0,759	0,798
	MRE%	41,86	61,81	57,86
Oswin	A	0,086	0,053	0,025
	B	1,012	1,159	1,419
	r^2	0,978	0,987	0,972
	MRE%	39,670	33,08	45,99
Chung y Fost	A	-0,162	-0,141	-0,121
	B	-0,162	-0,141	-0,121
	r^2	0,837	0,802	0,753
	MRE %	25,580	33,48	66,570

0.998 para las tres temperaturas. Los demás modelos presentaron un MRE superior al 10%. De acuerdo a estos resultados el modelo GAB es el apropiado para predecir el CHE en muestras de pitahaya entre 15 y 35 °C en el proceso de desorción; este modelo ha sido reportado como el de mejor ajuste de los valores experimentales de sorción en algunas frutas y alimentos en general [8, 28,31].

Las comparaciones de los valores experimentales del CHE y los predichos con el modelo GAB a 15, 25 y 35°C se muestran en la figura 1; puede notarse el buen ajuste de este modelo en todo el intervalo de actividad de agua. El modelo de GAB tiene la ventaja de suministrar valiosa información sobre el contenido de humedad en la capa monomolecular (x_0), siendo este parámetro fundamental para definir las condiciones de almacenamiento del alimento (Cuadro 2).

El x_0 indica la cantidad de agua que está fuertemente adsorbida en los sitios activos de la superficie de la fase sólida del alimento y se considera como el valor en el cual el alimento es más estable durante el almacenamiento; además el conocimiento de esta humedad es importante

para la determinación de las condiciones adecuadas de almacenamiento y el control de las reacciones de deterioro del alimento. Puede notarse que el x_0 calculado con el modelo GAB decreció con el aumento de la temperatura, desde 0.061 hasta 0.028 g agua/g ms, lo que indica que es dependiente de la temperatura en las condiciones del proceso de desorción ya mencionadas. Similar comportamiento se ha encontrado en níspero y membrillo [7] y en piña [8]. La disminución del x_0 con el incremento de la temperatura se debe posiblemente a que se provocan daños en los puntos activos de unión entre las moléculas de agua y la superficie de la fase sólida del alimento, ocasionando el desprendimiento de algunas moléculas de agua y por consiguiente la pérdida hidrófila. Algunos investigadores [7,32] explican que por efecto del incremento de la temperatura se reducen los puntos activos en la superficie alimento debido a cambios químicos y físicos.

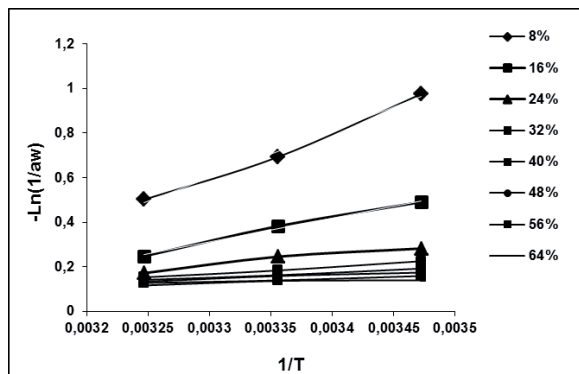
El modelo GAB contiene otros dos parámetros, C (constante de Guggenheim) y K relacionados con el calor de sorción de las moléculas de la monocapa y de las multicapas respectivamente (Cuadro 2). Se observó que el parámetro C disminuyó con el aumento de la temperatura desde 35,210 hasta 3,758, esto indica que a mayor temperatura decrece la energía de unión de las moléculas de agua en la monocapa. El parámetro K presentó poca variación con la temperatura, generalmente los valores de K son menores a la unidad, sin embargo, en pitahaya presentó valores levemente superiores a uno. Cuando K es superior a uno, indica que la isoterma tiende al infinito en un valor de a_w cercano a la unidad [33]. En la Figura 1 se observa que las isotermas de pitahaya tienden al infinito en valores aproximados a 0.9 de a_w .

Calor Isotérico de sorción.

Empleando el modelo de GAB para diferentes niveles de humedad en equilibrio se predijeron los valores de a_w y se construyeron las curvas de la Figura 2. Esta figura muestra la representación lineal de $-\ln(a_w)$ frente a $1/T$ de la ecuación de Clausius-Clayperon (Ec.2) para el cálculo del Q_{st} en la desorción de muestras de pitahaya.

La figura 3 muestra la evolución del Q_{st} frente al CHE de pitahaya. Se observó la dependencia del Q_{st} con el CHE; el Q_{st} disminuyó con el aumento del CHE variando desde 61.43 hasta 45.11 kJ/mol para humedades de

Figura 2. $-\ln(a_w)$ vs $1/T$ para el cálculo del calor isostérico de desorción en pitahaya

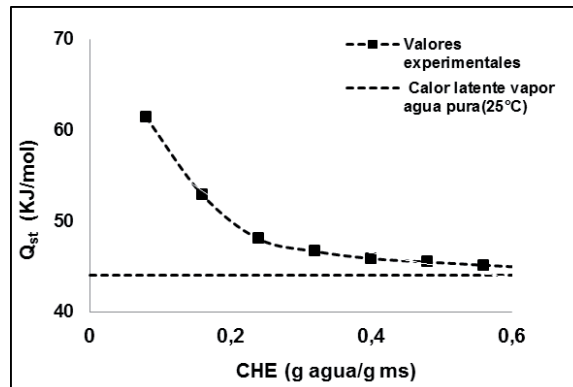


0.08 y 0.56 g agua/g ms respectivamente. Lo anterior indica que a bajos valores de CHE existe una mayor interacción sólido-agua en los sitios activos de unión en la superficie del producto, mientras que a altos valores de humedad el Q_{st} decrece debido a que el agua ocupa menos sitios activos.

Esto ocasiona una reducción en la interacción de energía entre las moléculas de agua y el material alimenticio (disminución de las fuerzas de enlace). Comportamiento similar se ha encontrado en isoterms de sorción en piña [8], tuna [34] y otros alimentos [27,35]. Algunos investigadores [36] explican que el aumento del calor de sorción a bajos valores de contenido de humedad se debe posiblemente a la fuerte resistencia al movimiento del agua desde el interior de la superficie de las muestras. Otros [8] dan una explicación física de este comportamiento, argumentan que se debe posiblemente a la existencia de sitios polares altamente activos en la superficie de la fase sólida del alimento, los cuales unidos con las moléculas de agua forman la llamada capa monomolecular; afirman además que para eliminar estas moléculas de agua se requiere alta cantidad de energía.

Se observó que los valores de Q_{st} en todo el intervalo de CHE son mayores que el calor de vaporización del agua pura ($\lambda_{(25\text{ }^\circ\text{C})} = 43.961 \text{ kJ/Kmol}$), lo anterior indica que la energía de interacción de las moléculas de agua en los sitios de desorción (puntos activos) en la superficie de la fase sólida del alimento es mayor que la energía en la cual se mantienen las moléculas de agua pura en la fase líquida. La relación entre el Q_{st} y el CHE en el proceso de desorción de muestras

Figura 3. Variación del calor isostérico de desorción frente al CHE de pitahaya amarilla



de pitahaya se puede representar por la expresión matemática (Ec. 3).

$$Q_{st} = 40.516 X^{-0.15} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$r^2 = 0.974$$

CONCLUSIONES

Las isoterms de desorción de muestras de pitahaya determinadas a 15, 25 y 35 °C presentaron comportamiento de tipo III, el cual es característico de alimentos ricos en compuestos solubles tales como los azúcares. Se evidenció la dependencia del CHE con la temperatura, notándose que disminuyó con el aumento de la temperatura para un valor constante de actividad de agua, lo que indica que la pitahaya es menos higroscópica a mayor temperatura de almacenamiento. El modelo de GAB presentó el mejor ajuste de los valores experimentales de desorción, lo cual indica que es el más apropiado para predecir el CHE en la pitahaya entre 15 y 35 °C. El Q_{st} disminuyó con el incremento del CHE desde 61.43 hasta 45.11 kJ/mol para humedades de 0.08 hasta 0.56 g agua/g ms respectivamente.

REFERENCIAS

[1] AYALA A.A., SERNA L. C. and GIRALDO C.C.J. Efecto de la agitación sobre la deshidratación osmótica de pitahaya amarilla (*Selenicereus Megalanthus S.*)

- empleando soluciones de sacarosa. *Interciencia*, 34,(7), 492-496. 2009.
- [2] RODRIGUEZ J.P., NARVÁEZ C.E. and RESTREPO L.P. Polygalacturonase activity in yellow pitaya peel (*Carex sp.*). *Acta Biol Colomb.* 11, (1), 65-74. 2006.
- [3] BARBEU, G. The strawberry pear, a new tropical fruit, *Fruits*, 45, 141-147, 1990.
- [4] WU, M. C. and CHEN, S. C. Variation of sugar content in various parts of pitaya fruit. *Proc. Fl. State Hort. Soc.*, 110, 225-227, 1997.
- [5] AYALA-APONTE. A. A., GIRALDO C. C. J. and SERNA L. C. Cinéticas de deshidratación osmótica de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*). *Interciencia*, 35,(7), 539-544. 2010a.
- [6] AYALA-APONTE. A. A., SERNA, L. C. and MOSQUERA, E. S. V. Liofilización de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*), *Revista de la facultad de química farmacéutica*, 17(2), 121-127. 2010b
- [7] MOREIRA, R., CHENLO, F., TORRES, M.D. and VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits, *J. Food Eng.*, 88, 514-521. 2008
- [8] SIMAL, S., FEMENIA, A., CASTELL-PALOU, A. and ROSSELLÓ C. Water desorption thermodynamic properties of pineapple, *J. of Food Eng.*, 80,(4), 1293-1301. 2007.
- [9] VAN Den BERG, C. and BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems. In: L.B. Rockland, F. and Stewart. (Eds.), *Water Activity: Influence on Food Quality*. Academic Press, New York, 147-177. 1981.
- [10] BRUNAUER, S., EMMETT, P.H. and TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers, *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-319. 1938.
- [11] IGUEDJAL, N.T., LOUKA, K. and ALLAF. Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression, *J. Food Eng.*, 85, 180-190. 2008.
- [12] AL-MUHTASEB, A., MUHANNED, A.H., MEGAHEY, E.K. and MCMINN, W.A.M. and MAGEE, T.R.A. Moisture adsorption isotherms of microwave-baked Madeira cake, *LWT - Food Sci. Technol.*, 43, 1042-1049, 2010.
- [13] RIZVI, S.S.H. Thermodynamics properties of food in dehydration. In M.A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds), *Engineering Properties of Foods*. New York: Marcel Dekker Inc, Cap. 3, 1995.
- [14] MCMINN, W. A. M. and MAGEE, T.R.A. Thermodynamics properties of moisture sorption of potato, *J. Food Eng.*, 60, 157-165. 2003.
- [15] WOLF, W., SPIESS, W.E.C. and JUNG, G. Standardization of Isotherm Measurements. In: D. Simatos, J.L. Multon, (Eds), *Properties of Water in Foods*. MartnusNijhoff Publishers: Dordrecht, Netherlands, 661-677, 1985.
- [16] GREESPAN, L. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Phys. Chem.*, 81, 89-96. 1977.
- [17] AOAC. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. *Moisture in dried fruits. Method 934.06*. Arlington, USA. 1990.
- [18] KAYA, S. and KAHYA OGLU, T. Thermodynamic properties and sorption equilibrium of pestil (grape leather), *J. Food Eng.*, 71, 200-207, 2005.
- [19] VEGA-GALVEZ, A., ARAVENA, E.L. and LEMUS-MONDACA, R. Adsorption isotherms of corn (*Zea mays L*) flour, *Ciencia e-Tecnología de Alimentos.*, 26, 821-827. 2006.
- [20] LOMAURO, C. J., BAKSHI, A.S. and CHEN, J.Y. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part 1. Fruit, vegetable and meat products, *Lebensm. Wiss. Technol.*, 18, 111-117. 1985.
- [21] TSAMI, E. Net isosteric heat of sorption in dried fruits, *J. Food Eng.*, 14, 327-335. 1991.
- [22] RAO, M.A. and RIZVI, S.S.H. *Engineering Properties of Foods* (Marcel Dekker Inc, New York, USA, 2nd ed., 223-309. 1995.
- [23] KAYMAK-ERTEKIN, F. and GEDIK A. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 37,(4), 429-438. 2004.
- [24] MORAGA, G., MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. and CHIRALT, A. Water sorption isotherms and phase transitions in kiwifruit, *J. of Food Eng.*, 72,(2), 147-156. 2006.
- [25] SARAVACOS, G.G., TSIOURVAS D.A. and E. Tsami. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins. *J. of Food Sci.*, 51, (2), 381-383. 1986.
- [26] HUBINGER, F.C., MENEGALLI, R.J., AGUERRE and SUAREZ, C. Water vapor adsorption isotherms of guava, mango and pineapple. *J. of Food Sci.*, 57, (6), 1405-1407. 1992.

- [27] JANJAI S., LAMLERT N., TOHSING K., MAHAYOTHEE B., BALA B.K. and MÜLLER, J. Measurement and modeling of moisture sorption isotherm of litchi (*Litchi Chinensis* Sonn), *International J. of Food Prop.*, 13,(2), 251–260. 2010.
- [28] ARÉVALO-PINEDO A., DOS SANTOS F.L., SALLES ARÉVALO Z.D. and ZUNIGA A.D.G. Desorption isotherms for murici (*Byrsonimasericea*) and inga (*Ingáedulis*) pulps. *J. of Food Eng.* 76,(4), 611-615. 2006.
- [29] MAZZA, G. Thermodynamic considerations of water vapour sorption by horseradish roots, *Lebensm. Wiss. Technol.*, 13, 13–17. 1980.
- [30] AI-MUHTASEB, A.H., MCMINN, W. and MAGEE, T.R.A. Water sorption isotherm of starch powders Part 1: Mathematical description of experimental data, *J. Food Eng.*, 61, 297–30. 2004.
- [31] GARCÍA-PÉREZ J.V., CÁRCEL J.A., CLEMENTE G. and MULET A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *LWT - Food Sci. and Technol.*, 41,(1), 18-25. 2008.
- [32] AVIARA, N.A. and AJIBOLA, O.O. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava, *J. of Food Eng.*, 55, (2), 107-113, 2002.
- [33] CHIRIFE, J., TIMMERMANN, O., IGLESIAS, H. A. and ANDBOQUET, R. Some features of the parameter K of the GAB equation as applied to sorption isotherms of selected food materials, *J. Food Eng.*, 15, 75–82. 1992.
- [34] LAHSASNI S., KOUHILA M. and MAHROUZ M. Adsorption–desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Energy Conversion and Management* 45, 249–261. 2004.
- [35] AYALA-APONTE, A.A. Estimación de las isotermas de adsorción y del calor isostérico en harina de yuca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9,(1), 88 – 96. 2011.
- [36] CENKOWSKI, S. JAYAS, D.S. and HAO, D. Latent heat of vaporization of selected foods and crops, *Can Agric. Eng.*, 34,(3), 281-286. 1992