

CINÉTICA DE IMBIBICIÓN E ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE HUMEDAD DE LA SEMILLA DE JAMAICA (*Hibiscus sabdariffa* L.)

IMBIBITION KINETICS AND MOISTURE SORPTION ISOTHERMS OF ROSELLE SEEDS (*Hibiscus sabdariffa* L.)

S. Domínguez-Domínguez¹, A. Domínguez-López^{1*}, A. González-Huerta¹ y S. Navarro-Galindo²

¹Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.
Universidad Autónoma del Estado de México. Campus Universitario "El Cerrillo"
A. P. 435. Toluca, Estado de México. C. P. 50200. México.

²Campo Experimental Chilpancingo. Delegación Estatal SAGARPA. Av. Ruffo Figueroa s/n, Col. Burócratas.
Chilpancingo, Guerrero. Mexico.

Recibido 15 de Diciembre 2006; Aceptado 23 de Noviembre 2007

Resumen

La jamaica es un arbusto que se cultiva para comercializar el cáliz de sus flores, pero como subproducto se obtienen las semillas, que por su valor nutritivo y alto rendimiento representan un potencial económico considerable. El objetivo de este trabajo fue describir la cinética de imbibición y las isotermas de adsorción de humedad a 25, 35 y 45°C en tres variedades cultivadas en México ("Criolla", "China" y "Sudán"). Los resultados mostraron que el proceso de imbibición describe una curva que se ajusta al modelo de Weibull, con coeficientes α de 12.99, 8.81 y 2.21 horas y β de 0.83, 1.70 y 0.72 para las variedades Criolla, China y Sudán, respectivamente. Los modelos de GAB, y de Chung-Pfost describieron adecuadamente las isotermas de adsorción. La humedad de la capa monomolecular (coeficiente a del modelo de GAB) resultó entre 3.97 y 5.71% b.s., lo cual representa una actividad de agua entre 0.1 y 0.30. Los calores isostéricos totales de adsorción obtenidos en el intervalo de humedades de equilibrio de 6 a 22% b.s., oscilaron entre 52.85 y 42.90 kJmol⁻¹, 60.99 y 43.41 kJmol⁻¹ y 51.23 y 43.20 kJmol⁻¹ para las variedades Criolla, China y Sudán, respectivamente. A humedades de equilibrio iguales o superiores a 12 % b.s., el calor isostérico fue similar a la entalpía de vaporización del agua, pero a humedades inferiores a 6% b.s., éste alcanzó los valores más elevados.

Palabras clave: *Hibiscus sabdariffa* L., semillas de jamaica, imbibición, isotermas de adsorción de humedad, distribución de Weibull, modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer, modelo de Chung-Pfost.

Abstract

Roselle is a shrub cultivated with the purpose of using the calyx of their flowers. However, the seeds are obtained as by-product and have a considerable economic potential owing their nutritive value and yield. The aim of this work was to describe the imbibition kinetics and moisture sorption isotherms at 25, 35 and 45°C, of three Roselle seed cultivars produced in Mexico ("Criollo", "China" and "Sudan"). Results indicated that the imbibition process describes a curve that follows the Weibull distribution with a α coefficient of 12.99, 8.81 and 2.21 hours and a β coefficient of 0.83, 1.70 and 0.72 for the Criollo, China, and Sudan cultivars, respectively. The GAB and the Chung-Pfost models describe appropriately the moisture sorption isotherms. Monolayer moisture content (a coefficient of GAB model) was 3.97 to 5.71 d.b. which represents a water activity value ranging from 0.1 to 0.30. Total isosteric heats of sorption, in the equilibrium moisture content region of 6 to 22% d.b., ranging from 52.85 to 42.90 kJmol⁻¹, for the Criollo cultivar, 60.99 to 43.41 kJmol⁻¹, for the China cultivar and 51.23 to 43.20 kJmol⁻¹, for the Sudan cultivar. At equilibrium moisture content up to 12% d.b., total isosteric heat of sorption was similar to the vaporization enthalpy of water, but at a moisture content lower to 6% d.b. this variable reached the highest values.

Keywords: *Hibiscus sabdariffa* L., roselle seeds, imbibition, moisture sorption isotherms, Weibull distribution, Guggenheim-Anderson-de Boer model, Chung-Pfost model.

* Autor para correspondencia: E-mail: adl@uaemex.mx
Tel. y Fax: (722) 296 5518

1. Introducción

La jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) es un arbusto perteneciente a la familia Malvaceae que se cultiva en ambientes con clima tropical seco. En México, en el Estado de Guerrero, se obtiene cerca del 90% de la producción nacional, con el fin de comercializar únicamente sus cálices deshidratados. En esta Entidad se siembran anualmente cerca de 12,000 ha, las cuales producen alrededor de 3,000 ton de cálices. Las principales variedades que se cultivan en nuestro país son: “Criolla” (con la mayor superficie cultivada), “Colimeña”, “China”, “Jerzy” y “Sudán” (Navarro-Galindo y col., 2002). Sus flores desarrollan un fruto que contiene alrededor de 5 g de semillas (Wong y col., 2002), lo que representa una producción de aproximadamente $1,875 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Navarro-Galindo y col., 2002). La experiencia de los productores guerrerenses confirma este dato: en la localidad de Jaltianguis, Gro. (México) la producción anual de semillas es de $2 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Actualmente, la utilidad de la semilla de jamaica es marginal. Se emplean cerca de $3 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ para la resiembra y, en algunas localidades del Estado de Colima, los campesinos la consumen tostada y molida como sustituto de café o bajo la forma de “atoles”. Es una excelente fuente de proteínas (30%) y aceites (22%) (Yagoub y col., 2004; Abu-Tarboush y col., 1997; El-Aldawy y Khalil, 1994) y en algunos países africanos se emplea tradicionalmente como un alimento cocido y fermentado, conocido en Sudán como “Furundu” (Yagoub y col., 2004) o en Nigeria como “Dadawa baso” (Dashak y col., 2001). Aun cuando contiene algunos compuestos relativamente tóxicos como el ácido fítico y el gopipol (Abu-Tarboush y Basher Ahmed, 1996; El-Aldawy y Khalil, 1994), en la actualidad existen métodos eficientes para eliminar estos compuestos, cuya tecnología se desarrolló sobre todo para el aprovechamiento de la semilla del algodón (Wang, 1987; Jefford y Grant, 1984; Kuk y Hron, 1998; Hron y col., 1994).

Por el gran potencial económico que tiene la semilla de jamaica, debido a su valor nutritivo y a su elevado rendimiento por hectárea, en el futuro podría manejarse una alta concentración de este subproducto en espacios reducidos. En ese momento será muy importante conocer con precisión las especificaciones necesarias para su acondicionamiento y almacenamiento, sobre todo en lo que concierne a su relación con la humedad ambiental y a su consecuente riesgo de germinación o alteración por el desarrollo de microorganismos o actividad química. Así, la cinética de imbibición permitirá determinar la velocidad de hidratación de las semillas y en consecuencia el tiempo previo a la germinación (Marabi y col., 2003; Sánchez, y col., 1997). Las isothermas de adsorción, por su parte, serán útiles para evaluar el intercambio de humedad de este subproducto y el aire que lo rodea, a una

temperatura constante. Con ésto, se podrán definir su humedad de equilibrio y actividad de agua, parámetros fundamentales para crear procesos destinados a prolongar su calidad germinativa y funcional (Ayranci y Duman, 2005). En este sentido, el objetivo de este trabajo fue caracterizar la cinética de imbibición de la semilla proveniente de las tres variedades más ampliamente cultivadas en México, así como determinar su humedad de equilibrio en ambientes con diferentes humedades relativas y temperaturas, es decir sus isothermas de adsorción de humedad.

2. Materiales y métodos.

2.1. Material biológico

Las variedades de jamaica evaluadas fueron “Criolla”, “China” y “Sudán”. Una muestra aleatoria de las semillas de cada una de ellas fue colectada en 2005 en las localidades guerrerenses de Teacoanapa, Jaltianguis y Xalpatlahuac (México). Cada muestra se colocó en bolsas de papel y se transportó al laboratorio donde fue seleccionada y liberada de impurezas. La humedad inicial (H_i) de estas semillas fue de 8.3 % de la materia seca (b.s.) para la variedad Criolla, 8.9 % b.s. para la China y 10.5 % b.s. para la Sudán.

2.2. Cinética de imbibición

Aproximadamente 16 g de semillas de cada variedad, separados en lotes de 1 g fueron sumergidos en agua destilada a 25°C y sin agitación durante 24 h. A intervalos de 1.5 h se registró el incremento de peso en cada lote, del que previamente se había obtenido su peso inicial. Así, se registró el tiempo de inmersión de la semilla en el agua, su peso inicial (W_i) y su peso final (W_f) y se estimó la cantidad de agua adsorbida (A_{ad}) con la Ec. (1). Este procedimiento se repitió tres veces y los promedios obtenidos se graficaron contra los tiempos de inmersión.

$$A_{ad} = \frac{W_f - W_i}{W_i \left(1 - \frac{H_i}{100}\right)} \quad (1)$$

2.3. Isothermas de adsorción

Para la obtención de las isothermas de adsorción en las tres variedades se utilizó la metodología del *American National Standards Institute* (2002), que consiste en colocar una muestra de semillas, durante un periodo de tiempo prolongado, en un recipiente cerrado cuyo interior se encuentra a humedad relativa y temperatura constantes. Dentro del recipiente, estas condiciones se logran mediante soluciones acuosas salinas a concentración de saturación. Se utilizaron tanques de vidrio para cromatografía en capa fina cuyo volumen

interior era igual a 4.54 l (27 x 24 x 7 cm.). Dentro de cada tanque se colocó un vaso de precipitados que contenía 60 ml de diferentes soluciones salinas saturadas. En la Tabla 1 se muestran las sales utilizadas, su solubilidad y la humedad relativa que producen en ambiente cerrado. Esta humedad fue verificada con un higrómetro digital portátil (Cole-Parmer, Modelo 37400-20) colocado temporalmente dentro de cada tanque. La diferencia entre la humedad relativa de la Tabla 1 y la obtenida con el higrómetro fue de 2% ($\pm 1.4\%$).

Los tanques herméticamente cerrados, con la solución saturada y aproximadamente 1 g de semilla de cada variedad se colocaron en una estufa a temperatura constante por 7 días. Las temperaturas evaluadas fueron 25, 35 y 45°C. En cada muestra se evaluó la humedad final, que fue considerada como la humedad de equilibrio a una humedad relativa y temperatura determinadas. Este procedimiento se repitió tres veces y finalmente se graficaron los promedios.

Tabla 1. Sales empleadas para mantener condiciones de humedad relativa constante.

Sal	Fórmula	Humedad Relativa (%)	Solubilidad (g/100 ml)
Cloruro de litio	LiCl	11	80
Acetato de potasio	KC ₂ H ₃ O ₂	23	281
Carbonato de potasio	K ₂ CO ₃	43	115
Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂ -6H ₂ O	52	125
Cloruro cúprico	CuCl ₂	67	76
Cloruro de sodio	NaCl	75	37
Bromuro de potasio	KBr	83	66
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	97	12

(Referencia: American National Standards Institute, 2002; Rockland, 1960).

2.4. Análisis de regresión

Para la obtención de la cinética de imbibición, esto es, para modelar la relación entre el tiempo de imbibición (t) y la hidratación de las semillas se aplicó el modelo de Weibull, que corresponde a la Ec. (2) (Saguy y Marabi, 2005). Este modelo es uno de los que mejor se ajusta cuando se busca evaluar el proceso de hidratación de diversos alimentos sumergidos en agua o soluciones acuosas en función del tiempo y para definir sus efectos sobre la viscosidad, la sinéresis, la porosidad y las propiedades sensoriales de los productos ya hidratados (Saguy y Marabi, 2005; Saguy y col., 2005; Marabi y col., 2003). La distribución de

Weibull es una ecuación exponencial definida por dos constantes: α (parámetro de escala de la curva, en unidades de tiempo) y β (parámetro de forma de la curva, adimensional).

$$A_{ad} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

Para obtener las isothermas de adsorción se emplearon los modelos de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), Sigma-Copace, Copace, Henderson, Chung-Pfost y Hasley (Tabla 2). Estos modelos se han empleado para describir matemáticamente la relación entre la actividad de agua y la humedad de equilibrio (H_{eq}) de productos agrícolas (Millán y col., 2001; Chen y Jayas, 1998; Chen y Morey, 1989a; Jayas y Mazza, 1993; Mazza y Jayas, 1991; Mesquita y col., 2001; Corrêa y Almeida, 1999). Con el fin de calcular las constantes en los modelos, su coeficiente de determinación (R^2) y su error estándar (EE), se utilizó el módulo de regresión no lineal del paquete estadístico Statgraphics 6.0Plus (Manugistics Corp.). Para todos los casos se empleó el método Marquardt con valores iniciales de los coeficientes de cada ecuación sugeridos por la literatura para otros productos agrícolas.

Tabla 2. Modelos empleados para estimar la humedad de equilibrio de semillas de jamaica (a , b y c son coeficientes, T la temperatura ambiental, en °C y A_a , la actividad de agua).

Número	Modelo	Ecuación
3	GAB	$\frac{abcA_a}{(1 - cA_a)(1 + (b-1)cA_a)}$
4	Sigma-Copace	$e^{(a-bT+ce^{A_a})}$
5	Copace	$e^{(a-bT+cA_a)}$
6	Henderson	$-\log(1 - A_a)^{ab}$
7	Chung-Pfost	$a - b \log(-T + c) \log A_a$
8	Hasley	$(-\log A_a)^{ab}$

Para determinar el calor isostérico total de adsorción (Q_{st}) se empleó la ecuación de Clausius-Clapeyron (Resende y col., 2006), cuya forma integrada se observa en la Ec. (9) y representa la relación lineal entre el logaritmo neperiano de la actividad de agua (A_a) y el recíproco de la temperatura, T (en K). En esta ecuación, la pendiente de la recta representa el calor isostérico neto de adsorción (q_{st}) dividido entre R (8.31451 kJmol⁻¹K⁻¹).

$$\ln(A_a) = \left(\frac{q_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} + C \quad (9)$$

Diversos valores de A_a , y H_{eq} fueron obtenidos a las temperaturas evaluadas a partir de las isothermas de adsorción que resultaron del mejor modelo, con lo que se calcularon los valores de q_{st} mediante regresión lineal. Finalmente, el calor isostérico total

de adsorción se obtuvo agregando la entalpía de vaporización del agua ($\Delta H_{vap} = 43.5224 \text{ kJmol}^{-1}$) a la temperatura intermedia de 35°C , con la Ec. (10).

$$Q_{st} = q_{st} + \Delta H_{vap} \quad (10)$$

3. Resultados y discusión.

3.1. Cinética de imbibición de la semilla de jamaica

En la Fig. 1 se muestra la imbibición de las semillas de jamaica de las variedades Criolla, China y Sudán, así como sus respectivas cinéticas, modeladas con la ecuación de Weibull. Las características fenotípicas de cada variedad podrían explicar su modo particular de hidratación. Nobel (1999) estableció que el grosor de la testa y el número de capas de células que la componen juegan un papel importante en este proceso. Además, la imbibición no es uniforme en toda la superficie de la semilla; siendo más elevada en las inmediaciones del micropilo y el embrión. Como las semillas no son cuerpos geométricos uniformes, la velocidad de transferencia de agua hacia el interior de las mismas no se explica solamente por variables geométricas tales como la relación superficie/volumen. Al respecto, Sánchez-Mendoza y col. (2007) evaluaron tres dimensiones axiales de estas semillas (largo, ancho y espesor), además de su densidad real y la masa de 1000 granos. A partir de estos resultados se obtiene que la relación superficie/volumen es de: 20.05, 18.23 y 17.44 cm para las variedades Criolla, China y Sudán, respectivamente. En la Fig. 1 se observa que en las variedades Sudán y China la hidratación fue relativamente rápida. Después de 10 h de inmersión, la primera llegó a un estado de saturación en el que se logró un incremento de cerca de 100% de su peso inicial, mientras que la segunda llegó al mismo estado después de 19 h. Finalmente, la variedad Criolla, que presenta la mayor relación superficie/volumen, llegó a una saturación después de 24 h de inmersión. En los tres casos, después de 24 h se observó la aparición de la radícula, producto de la germinación de la semilla. A partir de este momento, la hidratación ya no depende de las propiedades de la semilla, sino del desarrollo de la nueva planta. Estudios más precisos sobre las propiedades fenotípicas de las semillas y otras propiedades físicas que afectan a la difusión del agua dentro de la semilla serían necesarios para corroborar este aspecto.

En la Tabla 3 se presentan las constantes α y β del modelo de Weibull, los respectivos coeficientes de determinación (R^2) y los errores estándar (EE) de las tres variedades. El valor más pequeño de β se obtuvo en la variedad Sudán (Tabla 3), le sigue la Criolla y por último, con el más alto, la variedad China. En esta última se observó una pequeña fase *Lag* en las primeras dos horas de imbibición (Fig. 1). Machado y col. (1999) sugirieron que valores elevados de β implican que la hidratación en los

primeros instantes de la imbibición se efectúa lentamente; es decir, se manifiesta una fase *Lag*. Además, cuando este parámetro es igual a 1 el modelo se convierte en una cinética de primer orden. Según Saguy y Marabi (2005), α define la escala del proceso de imbibición y representa el tiempo necesario para lograr una hidratación de 63.21 g de agua/100g m.s. El valor más elevado de este coeficiente correspondió a la variedad Criolla e indica que ésta alcanzó la saturación tardíamente; le sigue la variedad China y, por último, la variedad Sudán. El comportamiento de imbibición de las tres variedades fue similar al de otras semillas, como las del pepino (Sánchez y col., 1997), o al de otros productos vegetales, como la zanahoria deshidratada (Marabi y col., 2003).

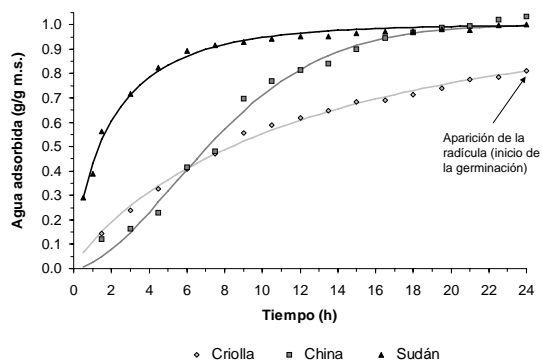


Fig. 1. Curvas de imbibición de las semillas de tres variedades de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.), utilizando sólo agua como medio de imbibición y modelado con la distribución de Weibull.

Tabla 3. Coeficientes α y β de la distribución de Weibull, sus coeficientes de determinación (R^2) y sus Errores estándar (EE), correspondientes a la imbibición de las variedades de jamaica Criolla, China y Sudán.

Coeficientes	Variedad		
	Criolla	China	Sudán
β (adimensional)	0.8288	1.6968	0.7177
α (h)	12.9877	8.8092	2.2118
R^2	99.53	98.59	99.31
Error estándar	0.0144	0.0393	0.0185

3.2. Isotermas de adsorción de la semilla de jamaica

La Fig. 2 muestra las humedades de equilibrio de las semillas, sometidas a diferentes humedades relativas (HR) y a temperaturas de 25, 35 y 45°C . La relación entre la actividad de agua ($A_a = \text{HR}/100$) y la humedad de equilibrio resultó de tipo sigmoideal para las tres variedades. A temperatura constante, la humedad de equilibrio de las semillas aumentó con el incremento de la HR. Asimismo, a HR constante,

el incremento de la temperatura provocó una disminución de su humedad de equilibrio, sólo que este efecto fue inverso cuando aquélla fue mayor a 85%. Alteraciones en la estructura molecular de los componentes de la semilla o posible solubilización de algunos compuestos pueden ser algunas causas de este comportamiento. Saravacos y col. (1986) mencionan, por ejemplo, la disolución de azúcares cuando la actividad de agua supera 0.5.

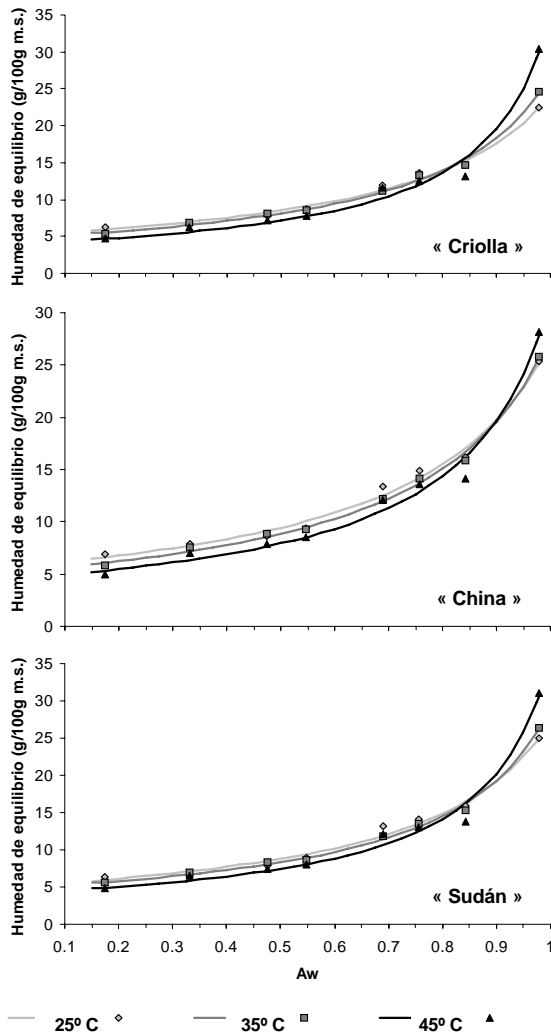


Fig. 2. Isotermas de adsorción de semillas de jamaica de las variedades Criolla, China y Sudán a 25, 35 y 45°C y modelado con la ecuación de GAB.

Los modelos matemáticos que mejor se ajustaron a los resultados (mayor valor de R^2 y menor valor del EE) fueron el de GAB y, en segundo lugar, el de Chung-Pfost. En la Fig. 2 se representa el modelo de GAB y en la Tabla 4 se muestran las constantes de ambos modelos y sus respectivos coeficientes R^2 y EE. Estos modelos han sido utilizados para evaluar el comportamiento de otros alimentos. Mazza y col. (1994) y Mazza y Jayas (1991), concluyeron que la humedad de equilibrio en

semillas de mostaza y girasol a diferentes HR se explicó adecuadamente con el modelo de GAB. Chen y Morey (1989b) observaron que la humedad de equilibrio en granos almidonosos y materiales fibrosos se representa adecuadamente con la ecuación de Chung-Pfost. En este sentido, Jayas y Mazza (1993) obtuvieron resultados similares en semillas de avena, mientras que Corrêa y Almeida (1999) en semillas de algodón.

Una ventaja del modelo de GAB es que sus coeficientes a , b y c tienen una interpretación física. El coeficiente a representa el contenido de humedad de la capa monomolecular (m_0), que se puede interpretar como un parámetro de las posibilidades de adsorción de humedad de los alimentos (Siripatrawan y Jantawat, 2006). En las semillas de jamaica m_0 tuvo valores entre 3.967 y 5.714 (% b.s.), que equivaldría a una actividad de agua entre 0.10 y 0.30. Lomauro y col. (1985) reportaron que los valores de m_0 para alimentos ricos en almidón oscilan entre 3.2 y 16% b.s. Dentro de este intervalo se encuentran los resultados obtenidos en este trabajo. El valor de m_0 tiende a disminuir con el incremento de la temperatura, lo que refleja una reducción en el número de sitios activos debido a cambios físicos y químicos inducidos por la temperatura (Mc Minn y Magee, 2003). La obtención de los valores de m_0 es importante, toda vez que el agua está fuertemente ligada al alimento debajo de este valor y no se encuentra disponible para ninguna reacción deteriorativa (ni como solvente ni como sustrato). Con esto se infiere que, además de la estabilidad química, el poder germinativo de la semilla se conserva en estas circunstancias. (Kaymak-Ertekin y Gedik, 2004). Los estimadores b y c (Tabla 4) se relacionan con la temperatura y con el calor isostérico durante la adsorción de agua en las semillas (Moreira y col., 2002).

Los calores isostéricos netos de adsorción fueron obtenidos con la Ecuación 10, empleando los valores de actividad de agua y humedades de equilibrio entre 6 y 22% b.s. (cada 2%) y a las temperaturas evaluadas experimentalmente. Las rectas resultantes de cada una de estas humedades mostraron coeficientes de determinación, R^2 , superiores a 90%. Los calores isostéricos totales de adsorción en función de la humedad de equilibrio se representan en la Fig. 3. En la variedad Criolla oscilaron entre 52.85 y 42.90 kJmol^{-1} ; para la variedad China, entre 60.99 y 43.41 kJmol^{-1} y para la variedad Sudán entre 51.23 y 43.20 kJmol^{-1} . Estos resultados son similares a los de Resende y col. (2006), quienes obtuvieron valores entre 71.3 y 48.9 kJmol^{-1} en frijol y a los de Ayraci y Duman (2005), quienes obtuvieron calores isostéricos totales para lentejas entre 60.5 y 44.5 kJmol^{-1} (con humedades de 4 a 16% b.s.).

Tabla 4. Coeficientes de los modelos de GAB y Chung-Pfost con sus coeficientes de determinación (R^2) y Errores estandar (EE).

Modelo	Cultivar	T (°C)	a	b	c	R^2 (%)	EE
GAB	Criolla	25	5.175	2921.0	0.7854	98.95	0.66
		35	4.794	949.3	0.8213	99.39	0.57
		45	3.967	2800.0	0.8862	98.12	1.32
	China	25	5.714	2856.0	0.7899	98.94	0.74
		35	5.305	277.4	0.8105	99.59	0.48
		45	4.547	2859.0	0.8544	98.22	0.68
	Sudán	25	5.312	145.6	0.8047	98.72	0.84
		35	4.853	2920.0	0.8320	99.38	0.53
		45	4.158	2896.0	0.8827	98.15	1.34
Chung-Pfost	Criolla	25	32.03	3.91	496.41	97.90	0.93
		35	33.34	4.47	321.76	99.27	0.62
		45	41.02	5.80	380.74	95.62	2.02
	China	25	33.61	4.40	280.64	98.17	0.98
		35	33.80	4.64	238.05	99.45	0.56
		45	39.72	5.26	481.77	97.89	1.25
	Sudán	25	33.62	4.54	279.65	97.76	1.12
		35	34.22	4.83	232.93	99.09	0.75
		45	41.54	5.94	343.21	96.15	1.93

En la Fig. 3 se observa que, al disminuir la humedad de equilibrio, el valor de Q_{st} fue mayor y que con humedades entre 22% y 12 % b.s., el calor isostérico total fue prácticamente igual que la entalpía de vaporización del agua, por lo que se infiere que las humedades dentro de este intervalo representan el agua libre de las semillas (Wang y Brennan, 1991). Por otro lado, a humedades inferiores a 6% b.s. el calor isostérico total alcanza los valores más elevados, esto indica que existen interacciones más fuertes entre las moléculas de agua y los componentes de la semilla (Mulet y col. 2002). Los valores a en la ecuación de GAB (Tabla 4) fueron todos inferiores a 6%, lo que establece una coincidencia entre las mayores cantidades de energía para la remoción del agua y el hecho de que este coeficiente sea un buen estimador de la humedad de la capa monomolecular en las semillas.

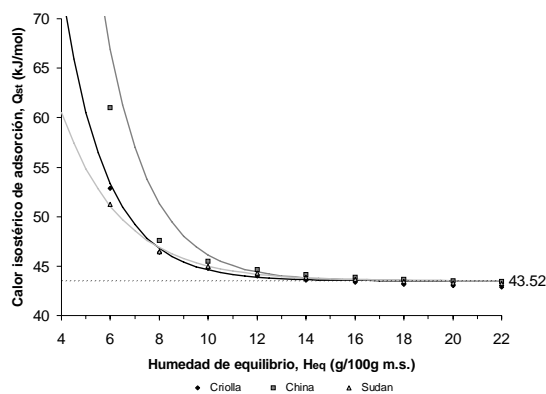


Fig. 3. Calores isostéricos totales de adsorción en función de la humedad de equilibrio de las semillas de jamaica de las variedades Criolla, China y Sudán.

En la Tabla 5 se muestran los coeficientes A y B del modelo exponencial que define adecuadamente la relación entre el calor isostérico total de adsorción y la humedad de equilibrio, representada en la Fig. 3 (Ec. (11)). El coeficiente A mide la cantidad de energía necesaria para remover la humedad de la semilla, mientras que el coeficiente B es un estimador de la velocidad de disminución del calor isostérico total de adsorción al incrementarse la humedad de equilibrio. Este modelo también ha sido empleado en otras semillas (Moreira y col. (2002) en semilla de garbanzo; Resende y col. (2006) en frijol) y en pulpa de mango (Da Silva y col., 2002).

$$Q_{st} = A \exp(BH_{eq}) \quad (11)$$

Tabla 5. Coeficientes del modelo exponencial para predecir la relación entre el calor isostérico total de adsorción y la humedad de equilibrio en las semillas de jamaica de las variedades Criolla, China y Sudán.

Variedad	A	B	R^2 (%)
Criolla	267.40	-0.5509	98.02
China	625.23	-0.5479	80.81
Sudán	86.80	-0.4072	98.80

Conclusiones

En este trabajo se obtuvieron las cinéticas de imbibición de las semillas de jamaica en las variedades Criolla, China y Sudán, así como sus isotermas de adsorción de humedad a 25, 35 y 45°C. A partir de éstas, se derivaron los respectivos calores isostéricos totales de adsorción. Los resultados reflejan que el proceso de imbibición describe una curva que se ajusta adecuadamente al modelo de

Weibull ($R^2 > 98\%$), con coeficientes α de 12.99, 8.81 y 2.21 h y β de 0.83, 1.70 y 0.72 para las variedades Criolla, China y Sudán, respectivamente. Para las isotermas de adsorción de humedad el modelo de GAB tuvo el mejor ajuste ($R^2 > 98\%$), seguido por el de Chung-Pfost. El coeficiente a estimó de la humedad a la cual las alteraciones en la calidad del producto son mínimas (capa monomolecular) y tuvo valores entre 3.967 y 5.714% b.s., que equivale a una actividad de agua entre 0.10 y 0.30.

Con humedades de equilibrio entre 6 y 22% b.s., los calores isotéricos totales de adsorción oscilaron entre 52.85 y 42.90 kJmol⁻¹, para la variedad Criolla, entre 60.99 y 43.41 kJmol⁻¹ para la variedad China y entre 51.23 y 43.20 kJmol⁻¹ para la variedad Sudán.

En el intervalo de humedades de equilibrio de 22 a 12 % b.s., el calor isotérico total fue igual que la entalpía de vaporización del agua, pero a valores inferiores a 6% b.s., el calor isotérico total alcanzó los valores más elevados, coincidiendo con el hecho de que los valores del coeficiente a en la ecuación de GAB fueron inferiores a 6%. El modelo exponencial definió adecuadamente la relación entre el calor isotérico total de adsorción y la humedad de equilibrio en las semillas de jamaica.

Referencias

- Abu-Tarboush, H.M. y Basher-Ahmed, S.A. (1996). Studies on karkade (*Hibiscus sabdariffa*): protease inhibitors, phytate, *in vitro* protein digestibility and gossypol content. *Food Chemistry* 56, 15-19.
- Abu-Tarboush, H.M., Ahmed, S.B. y Al Khatani, H.A. (1997). Some nutritional and functional properties of karkade (*Hibiscus sabdariffa*) seed products. *Cereal Chemistry* 74, 352-355.
- American National Standards Institute. (2002). Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. Designation: E 104-02. *Annual Book of ASTM Standards* 11.03, 1133-1137.
- Ayranci, E. y Duman, O. (2005). Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isolate at 10, 20 and 30 °C. *Journal of Food Engineering* 70, 83-91.
- Chen, C.C. y Jayas, D.S. (1998). Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural products. *Transactions of the ASAE* 41, 1755-1760.
- Chen, C.C. y Morey, R.V. (1989a). Equilibrium relative humidity (ERH) relationships for yellow-dent corn. *Transactions of the ASAE* 32, 999-1006.
- Chen, C.C. y Morey, R.V. (1989b). Comparison of four EMC/ERH equations. *Transactions of the ASAE* 32, 983-990.
- Corrêa, P.C. y Almeida, F.A.C. de (1999). Comparação de modelos matemáticos de equilíbrio higroscópico para semente e fibra de algodão herbáceo, cultivar redenção. *Revista de Oleaginosas e Fibras* 3, 1-6.
- Da Silva, M.M., Gouveia, J.P.G. de. y Almeida, F. de A.C. (2002). Dessorção e calor isotérico em polpa de manga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 6, 123-127.
- Dashak, D.A., Dawang, M.L. y Lucas, N.B. (2001). An assessment of the proximate chemical composition of locally produced spices known as dadawa basso and dadawa kalwa from three markets in Plateau State of Nigeria. *Food Chemistry* 75, 231-235.
- El-Adawy, T.A. y Khalil, A.H. (1994). Characteristics of Roselle Seeds as a New Source of Protein and Lipid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 42, 1896-1900.
- Hron, R.J.S., Kuk, M.S., Abraham, G. y Wan, P.J. (1994). Ethanol extraction of oil, gossypol and aflatoxin from cottonseed. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 71, 417-421.
- Jayas, D.S. y Mazza, G. (1993). Comparison of five, three-parameter equations for the description of adsorption data of oats. *Transactions of the ASAE* 36, 119-125.
- Jefford, C.W. y Grant, H.G. (1984). An improved method for high-performance liquid chromatography of gossypol. *Analytica Chimica Acta* 166, 311-314.
- Kaymak-Ertekin, F., Gedik A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption of grapes, apricots, apples and potatoes. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 37, 429-438.
- Kuk, M.S. y Hron, R.J.S. (1998). Cottonseed extraction with a new solvent system: isohexane and alcohol mixtures. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 75, 927-930.
- Lomauro, C.J., Bakshi, A.S., Labuza T.P. (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherms equations. Part II: Milk, coffee, tea, nuts, oilseeds, spices and starchy foods. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 18, 118-124.
- Machado, M.F., Oliveira, F.A.R. y Cunha, L.M. (1999). Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by ready-to eat breakfast cereal. *International Journal of Food Science and Technology* 34, 47-57.
- Marabi, A., Livings, S., Jacobson, M. y Saguy, I.S. (2003). Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research & Technology* 217, 311-318.

- Mazza, G. y Jayas, D.S. (1991). Equilibrium moisture characteristics of sunflower seeds, hulls, and kernels. *Transactions of the ASAE* 34, 534-538.
- Mazza, G., Jayas, D.S., Oomah, B.D. y Mills, J.T. (1994). Comparison of five three parameter equations for the description of moisture sorption data of mustard seeds. *International Journal of Food Science & Technology* 29, 71-81.
- Mc Minn, W.A.M., Magee, T.R.A. (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of Food Engineering* 33, 227-237.
- Mesquita, J.B., Andrade, E.T. y de Corrêa, P.C. (2001). Modelos matemáticos e curvas de umidade de equilíbrio de sementes de jacarandá-da-bahia, angico-vermelho e óleo-copaíba. *Cerne* 7, 12-21.
- Millán, F.R., Roa, V. y Tapia, M.S. (2001). Modelado matemático de isothermas de adsorción de humedad en alimentos usando redes neuronales artificiales. *Interciencia* 26, 190-194.
- Moreira, R., Vázquez, G. y Chenlo, F. (2002). Influence of the temperature on sorption isotherms of chickpea: evaluation of isosteric heat of sorption. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry* 1, 1-3.
- Mulet, A., García-Pascual, P., Sanjuán, N. y García-Reverter, J. (2002). Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). *Journal of Food Engineering* 53, 75-81.
- Navarro-Galindo, S., Cruzaley-Sarabia, R., Reyes, J.M., Noriega-Cantú, D.H. y Miranda-Salazar, F. (2002). Nueva Alternativa Tecnológica para Producir Maíz-Jamaica en Áreas Potenciales de Guerrero. (Folleto para productores No. 11). Area Agrícola SAGARPA-INIFAP, México.
- Nobel, P.S. (1999). Plant Physiology. 2nd Edition. *Academic Press. USA*. Pp: 372-373.
- Resende, O., Corrêa, P.C., Goneli, A.L.D. y Ribeiro, D.M. (2006). Isothermas e calor isostérico de sorcao do feijao. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos, Campinas* 26, 626-631.
- Rockland, L.B. (1960). Saturated salt solutions for static control of relative humidity between 5° and 40° C. *Analytical Chemistry* 32, 1375.
- Saguy, I.S. y Marabi, A. (2005). Rehydration of dried food particulates. *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering* 1, 1-9.
- Saguy, I.S., Marabi, A. y Wallach, R. (2005) New approach to model rehydration of dry food particulates utilizing principles of liquid transport in porous media. *Trends in Food Science and Technology* 16, 495-506.
- Sánchez, J.A., Calvo, E., Orta, R., Muñoz, B. (1997). Tratamientos pregerminativos de hidratación. Deshidratación para semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.). *Acta Botánica Mexicana* 38, 13-20.
- Sánchez-Mendoza, J., Domínguez-López, A., Navarro-Galindo, S., López-Sandoval, J. A. (2007). Some physical properties of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds as a function of moisture content. *Propuesto a Journal of Food Engineering*.
- Saravacos, G.D., Tsiogras, D.A. y Tsami, E. (1986). Effect of temperature on the water adsorptions isotherms of Sultana Raisins. *Journal of Food Science* 51, 381, 383, 387.
- Siripatrawan, U., Jantawat, P. (2006). Determination of moisture sorption isotherms of jasmine rice crackers using BET and GAB models. *Food Science and Technology International* 12, 459-464.
- Wang, M-Z. (1987). Analysis of gossypol by high performance liquid chromatography. *Journal of Ethnopharmacology* 20, 1-11.
- Wang, N. y Brennan, J.G. (1991). Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures *Journal of Food Engineering* 14, 269-287.
- Wong, P-K., Yusof, S., Ghazali, H.M. y Che Man, Y.B. (2002). Physico-chemical characteristics of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Nutrition & Food Science* 32, 68-73.
- Yagoub, A.E.A., Mohamed, B.E., Ahmed, A.H.R. y El Tinay, A.H. (2004). Study on Furundu, a traditional sudanese fermented Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seed: Effect on *in vitro* protein digestibility, chemical composition, and functional properties of the total proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52, 6143-6150.