

Isotermas de Adsorción de Humedad de la Cereza de Cayena (*Eugenia uniflora* L.) en polvo¹

Moisture adsorption isotherms of surinam cherry (*Eugenia uniflora* L) powder

Francisca Marta N. Oliveira^{2*}, Rossana M. F. de Figueirêdo³, Alexandre José de M. Queiroz³

Recibido: abril 24 de 2014

Aceptado: septiembre 23 de 2015

Resumen

Se determinaron las isotermas de adsorción de humedad del polvo de cereza de cayena a temperaturas de 10, 20, 30 y 40°C., las muestras en polvo fueron obtenidas a partir de una mezcla de pulpa de la cereza, 15% de maltodextrina y 30% de agua destilada (p/p). Esta mezcla fue deshidratada por aspersion, de acuerdo con el sitio de recolección de la muestra en la secadora, se obtuvieron tipos de muestras: el polvo recogido en la cámara de secado (tipo A) y el polvo recogido en el ciclón (tipo B). Los modelos de GAB, Peleg, Halsey modificado, Smith, Day & Nelson y Sigma-CPACO se ajustaron a los isotermas de adsorción de humedad de los tipos A y B. El Modelo Peleg fue el que mejor representó las isotermas de adsorción de humedad para los dos tipos de muestras.

Palabras clave: *Eugenia uniflora*, fruta, actividad de agua, pitanga

¹Parte de la disertación del autor.

²U. Nilton lins, Manaus, Brasil

³Centro de tecnología y recursos naturales / U. Federal de Campina grande UFCG, Brasil

*/a quien debe ser enviada la correspondencia

Abstract

The moisture adsorption isotherms of surinam cherry powder in temperatures of 10, 20, 30 and 40°C were determined. The powder samples were produced of a formulated pulp, composed of surinam cherry pulp with 15% of maltodextrin and 30% of distilled water (p/p). The formulated pulp was dehydrated in spray-dryer, obtaining two types of samples according to the position in that it was collected in the dryer: the powder collected in the drying chamber (powder type A) and the powder collected in the cyclone (powder type B). The moisture adsorption isotherms of powders type A and B, were fitted using GAB, Peleg, modified Halsey, Smith, Day & Nelson and Sigma-Copace models. The model of Peleg represented better the moisture adsorption isotherms for the two sample types.

Keywords: Eugenia uniflora, fruits, water activity, pitanga

1. Introducción

La fruticultura a través del uso de tecnologías no agresivas para el medio ambiente y la salud humana debe ser capaz de producir productos de calidad y saludable, de acuerdo con los principios de sustentabilidad ambiental, de seguridad alimentaria y de la viabilidad económica. Esta actividad es de suma importancia para Brasil, porque juega un papel económico, social y alimenticio [1]. Dotado con la mayor diversidad del mundo de las especies y variedades de clima y suelo propicio para la producción de fruta más conocida de plantas nativas, Brasil tiene un potencial para producir frutos que poco a poco han sido objeto de explotación comercial, incorporando ejemplares nativos con características de color, sabor y aroma de gran atractivo para los estantes de los supermercados, menús de restaurantes y la canasta de exportaciones.

La cereza de cayena (*Eugenia uniflora* L.) pertenece a la familia Myrtaceae, que consta de más de 100 géneros y 3.600 especies. Son árboles y arbustos de hojas perennes [2]. Es una especie tropical, nativa del sur y del sudeste de Brasil y se ha adaptado bien a las condiciones climáticas y del suelo del Nordeste [3]. En Brasil, el Estado de Pernambuco es uno de los principales productores, con una producción de fruta entre 1.300 y 1.500 toneladas / año [4]. La cereza de cayena es una fruta muy apreciada debido a su agradable sabor y aroma. [5] Su importancia económica es cada vez mayor debido a sus excelentes propiedades sensoriales y alto contenido en vitaminas A y C, y está entre los frutos con alto contenido de carotenoides totales (225,9 mg / g).

Debido a que es un fruto muy percedero una alternativa para su comercialización es su transformación en un producto deshidratado. Los alimentos en polvo han aumentado su espacio de mercado porque

además de poder ser acondicionados en diferentes formas, poseen un bajo contenido de agua, una buena capacidad de almacenamiento, lo que reduce los costes de embalaje, transporte, almacenamiento y conservación, así como la incorporación de valor a las materias primas.

Sin embargo, es necesario conocer el comportamiento higroscópico de estos materiales y su estabilidad física y química, datos cruciales para la proyección de su comportamiento en diferentes condiciones de ambiente de humedad relativa y de la vida.

Este trabajo se realizó con el fin de determinar las isotermas de adsorción de humedad del polvo de cereza de cayena a temperaturas de 10, 20, 30 y 40°C.

2. Materiales y Métodos

El experimento se realizó en el Laboratorio de almacenamiento y transformación de productos agrícolas de la Unidad Académica de Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Campina Grande.

La materia prima utilizada fue pulpa de cereza de cayena congelada, adquirida en el supermercado local. Después de compradas las pulpas fueron transportadas al laboratorio, homogeneizadas, re-empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad, congeladas en nitrógeno líquido y almacenado a -22°C, hasta su utilización en los experimentos. El producto en polvo se obtuvo por secado de la mezcla

de pulpa de cereza de cayena con 15% de maltodextrina (MOR-Rex® 1910) y 30% de agua destilada (w / w). El secado fue realizado en un secador por pulverización (secador de spray), 1,0 MSD marca modelo LM Labmaq Brasil, utilizando una boquilla neumática 1,0 mm, de bombeo del flujo de pulpa de 0,5 l / h temperaturas de entrada y de salida igual a 140°C y 80°C respectivamente. Después del secado, se recogieron dos tipos de muestra en el secador: el polvo recogido en la cámara de secado, polvo tipo A, y el polvo recogido en el ciclón, polvo tipo B.

Las isotermas de adsorción de humedad de las muestras se determinaron por el método gravimétrico estático utilizando soluciones salinas saturadas (Tabla 1) a temperaturas de 10, 20, 30 y 40°C, controladas en cámaras de B.O.D. Se puso aproximadamente 1g de cada muestra en crisoles, los cuales fueron colocados dentro de un recipiente de vidrio hermético, permaneciendo en este ambiente hasta alcanzar el equilibrio. Posteriormente, las muestras se llevaron a 105°C hasta peso constante para determinar el contenido de humedad de equilibrio. El contenido de humedad de equilibrio sobre base seca se determinó por la relación entre la masa de agua y la masa de la muestra seca (Ecuación 1).

$$U_e = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{seca}}} 100 \quad (1)$$

En donde:

U_e - unidad de equilibrio (% base seca)

m_{agua} - masa de agua adsorbida por la muestra (g)

m_{seca} - masa seca de la muestra (g)

TABLA 1. Actividad de agua (a_w) de las soluciones saturadas de sales.

Sal	Temperatura			
	10°C	20°C	30°C	40°C
Acetato de potasio (CH_3COOK)	0,2338	0,2311	0,2161	0,2040
Cloruro de magnesio (MgCl_2)	0,3347	0,3307	0,3244	0,3600
Carbonato de Potasio (K_2CO_3)	0,4314	0,4316	0,4317	0,4320
Nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)	0,5736	0,5380	0,5140	0,4842
Bromuro de sódio (NaBr)	0,6215	0,6021	0,5603	0,5317
Cloruro de sódio (NaCl)	0,7567	0,7547	0,7509	0,7468
Sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	0,8206	0,8134	0,8063	0,7991
Cloruro de potasio (KCl)	0,8677	0,8511	0,8362	0,8232

Fuente: GREENSPAN [6].

Para la obtención de las isotermas de adsorción de humedad de las muestras fueron utilizados los modelos de GAB, Peleg, Halsey modificado, Smith, Day & Nelson e Sigma-Copace, presentados en la Tabla 2.

En donde:

U_e – unidad de equilibrio

X_m – unidad en la monocamada molecular

C e K – parámetros que dependen de la temperatura y de la naturaleza del

producto

K_1, K_2, n_1, n_2, a, b e c - constantes del modelo

Para la determinación del mejor ajuste de los modelos a los datos experimentales fueron utilizados como criterios el coeficiente de determinación (R^2) y la desviación porcentual media (P), este último calculado según la Ecuación 2.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{U_{e \text{ observado}} - U_{e \text{ previst}}}{U_{e \text{ observado}}} \right| \quad (2)$$

TABLA 2. Modelos utilizados ajustados a las isotermas de adsorción de humedad de las muestras de cereza de cayena en polvo.

Modelo	Equación	Referencia
GAB	$U_e = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)}$	[7]
Peleg	$U_e = k_1 (a_w)^{n_1} + k_2 (a_w)^{n_2}$	[8]
Halsey modificado	$U_e = \left[\frac{-\exp(a + bT)}{\ln(a_w)} \right]^c$	[9]
Smith	$U_e = a - b [\ln(1 - a_w)]$	[10]
Day & Nelson	$U_e = \exp [a + b(\ln(-\ln(1 - a_w)))]$	[11]
Sigma-Copace	$U_e = \exp [a - (bT) + (c \exp(a_w))]$	[12]

En donde:

$U_{e \text{ observado}}$ - unidad de equilibrio determinada experimentalmente (% b.s.)

$U_{e \text{ prevista}}$ - unidad de equilibrio teórica (% b.s.)

3. Resultados y discusión

Los datos experimentales del contenido de humedad de equilibrio de la cereza de cayena en polvo de los tipos A y B en función de la actividad de agua (a_w) a temperaturas de 10, 20, 30 y 40°C se muestran en la Tabla 3, donde se puede observar el aumento de la humedad de equilibrio (U_e) con el aumento de la actividad de agua (a_w), esto es similar a lo observado para las isotermas de adsorción de cereza de la india (*Malpighia emarginata*) en polvo [13]. Con el aumento de las temperaturas se observa una disminución de la humedad de equilibrio, coincidiendo con los resultados de las isotermas de adsorción de guaraná en polvo deshidratado en

secador por aspersión a temperaturas de 15, 25 y 35°C [14].

Se observó que, en la mayoría de los casos, los valores de humedad de equilibrio de la cereza de cayena en polvo de tipo B fueron más altos, lo que indica que es más higroscópico que el polvo tipo A. Se sabe que el polvo recogido en el ciclón, polvo tipo B, tiene partículas más pequeñas, lo cual fue confirmado visualmente, por lo tanto, mayor área superficial. Esta característica puede ser responsable del aumento de adsorción de humedad, si tenemos en cuenta que a mayor área superficial hay un mayor número de sitios activos [15].

En la Tabla 3 se observa que las muestras almacenadas a temperaturas de 20 y 30°C y con actividad de agua entre 0,76 y 0,87 del polvo tipo A, presentaron una humedad de equilibrio entre 20,8 y 35,3% db y el polvo tipo B entre 20,4-

TABLA 3. Valores experimentales de humedad de equilibrio (U_e) en base seca (%bs) en las diferentes actividades de agua (a_w) de las muestras de cereza de cayena en polvo de los tipos A y B.

Temperatura											
10°C			20°C			30°C			40°C		
a_w	U_e Tipo A	U_e Tipo B	a_w	U_e Tipo A	U_e Tipo B	a_w	U_e Tipo A	U_e Tipo B	a_w	U_e Tipo A	U_e Tipo B
0,2338	7,8588	8,1263	0,2311	6,7476	7,0179	0,2161	6,1228	6,5382	0,2040	3,8901	5,5853
0,3347	8,1024	9,3015	0,3307	7,9207	8,8224	0,3244	7,1385	7,7869	0,3160	4,4211	7,0326
0,4183	8,9366	11,3616	0,3965	8,1446	10,4185	0,3615	7,9690	9,8334	0,4220	6,4622	9,3210
0,5736	13,2142	15,2973	0,5438	12,4519	14,0850	0,5140	11,4799	13,0969	0,4842	10,8636	11,6643
0,6215	14,3641	19,4841	0,5914	13,9671	15,5236	0,5603	12,7283	15,2644	0,5317	11,5887	14,4313
0,7567	23,5176	28,5395	0,7547	21,4871	23,6679	0,7509	20,7956	20,3776	0,7468	17,7163	19,7441
0,8206	35,3241	34,1910	0,8134	29,0517	31,2696	0,8063	28,1374	30,4144	0,7991	27,0340	28,5823
0,8677	40,3375	39,7182	0,8511	35,3194	37,3231	0,8362	32,4924	35,4560	0,8232	30,5588	33,5430

Fuente: cálculo en estudio

37,3% db, estos porcentajes son similares a los observados para las isotermas de adsorción de humedad del jobo (*Spondias mombin*) en polvo a temperaturas entre 10 y 50°C [16]. Con estos niveles de humedad las muestras pueden sufrir aglomeración de sus partículas y crecimiento de microorganismos,

lo que indica la necesidad de utilizar embalajes impermeables para asegurar el almacenamiento y permitir una vida útil en condiciones ambientales.

En la Tabla 4 se observan los modelos y los valores de los parámetros utilizados para los ajustes de las isotermas de adsorción

TABLA 4. Parámetros de los modelos ajustados a las isotermas de adsorción de cereza de cayena en polvo tipo A.

Modelo	Parámetros	Temperatura (°C)			
		10°C	20°C	30°C	40°C
GAB	X_m	6,4805	5,7797	5,6823	5,0609
	C	12,3323	24,5322	19,0232	6,7605
	K	0,9765	0,9844	0,9891	1,0178
	R^2	0,9839	0,9978	0,9976	0,9762
	P (%)	7,06	3,00	2,75	12,68
Peleg	K_1	65,7475	73,5076	82,2536	310,9320
	n_1	4,9530	8,4639	9,0918	16,5910
	K_2	8,7086	18,7660	19,0965	24,2083
	n_2	0,0807	0,7679	0,8108	1,2937
	R^2	0,9931	0,9971	0,9980	0,9853
	P (%)	3,11	4,23	3,88	12,69
Halsey modificado	a	102,2600	28,1774	128,8607	495,7793
	b	-9,9610	-1,2759	-4,2093	-12,3461
	c	0,8114	0,7931	0,8070	0,9535
	R^2	0,9834	0,9971	0,9970	0,9744
	P (%)	7,30	3,93	2,85	12,28
Smith	a	-1,0438	0,1280	0,3901	-1,6280
	b	19,5276	17,1052	16,5699	17,2280
	R^2	0,9521	0,9709	0,9761	0,9572
	P (%)	17,12	11,34	8,97	15,00
Day & Nelson	a	2,8558	2,8220	2,8168	2,7064
	b	1,1801	1,0616	1,0267	1,1894
	R^2	0,9627	0,9726	0,9760	0,9630
	P (%)	16,22	11,10	10,64	13,56
Sigma-Copace	a	-13,5923	-22,1571	-17,2728	-21,5012
	b	-1,3039	-1,0914	-0,5657	-0,5158
	c	1,7854	1,6442	1,6227	1,8639
	R^2	0,9828	0,9883	0,9900	0,9658
	P (%)	9,72	5,71	4,28	12,62

Fuente:

de humedad de la cereza de cayena en polvo del tipo A, los coeficientes de determinación (R^2) y la desviación media porcentual (P).

De acuerdo con los coeficientes de determinación (R^2) y las desviaciones no hubo, en todas las temperaturas evaluadas, un modelo único que presentara los menores valores de P junto con los mayores valores de R^2 para el polvo tipo A.

A la temperatura de 10°C el modelo de Peleg fue el que mejor se ajustó a los resultados experimentales con el menor valor de P (3,11%) y mayor R^2 (0,9931). El modelo de Peleg también se ajusta bien a los datos experimentales de la isoterma de adsorción de la pera deshidratada a una temperatura de 40°C, con un valor de $R^2 = 0,99$ y de P = 9,14%, pero a temperaturas de 60 y 80°C, el ajuste no fue tan bueno, observándose valores de P = 15,34% y 19,51%, respectivamente [17]. Además de estos modelos, a 10°C, los de GAB, Halsey modificado y Sigma-CECAF, en este orden pueden ser utilizados, para estimar las isotermas de adsorción de humedad de la cereza de cayena en polvo tipo A, teniendo en cuenta que presentaron valores de desviación media entre 5% y 10% y R^2 mayor que 0,98. A temperaturas de 20 y 30°C, el modelo que mejor se ajustó fue el de GAB (P <5% R^2 > 0,99), pero los modelos modificados Halsey y Peleg pueden ser usados con buena precisión (P <5% R^2 > 0,99).

A 40°C no se obtuvo un buen ajuste con los modelos probados. El modelo de Peleg

fue el que mejor se comportó, teniendo en cuenta que presentó un valor de P = 12,69% y $R^2 = 0,9853$, y los modelos de GAB, Halsey modificado, Sigma-CECAF y Day & Nelson resultaron con valores de P alrededor del 12,5% y R^2 entre 0,96 y 0,97, diferente a lo encontrado con el café soluble, en donde el ajuste del modelo Sigma-CECAF a las isotermas de adsorción de humedad a 40°C mostró buenos resultados con un valor de $R^2 = 0,99$ y P = 8,1% [12]. El modelo de Halsey modificado, presentó un buen ajuste de los datos experimentales, mostrando un coeficiente de correlación $R^2 = 0,99$ a temperaturas de 30,40 y 50°C [9]. El modelo de Smith, aunque no presentó un buen ajuste, su R^2 fue mejor que los reportados en muestras de harina de soja a temperaturas de 25, 32 y 45°C, en donde los valores fueron de R^2 de 0,8792, 0,8919 y 0,8514 respectivamente [18].

Los valores de humedad de la monocapa (X_m), obtenido con el modelo de GAB, mostraron una disminución con el aumento de la temperatura. Este comportamiento de X_m con la temperatura se puede atribuir a la reducción en el número de zonas activas como resultado de cambios físicos y / o químicos inducidos por calentamiento [19]. En las cuatro temperaturas utilizadas, los valores de X_m para el polvo tipo A oscilaron entre 6,5% y 5,1%, siendo estos inferiores a los obtenidos con el jobo en polvo, los cuales oscilaron entre 17,9% a 6,8% db a temperaturas entre 10 y 40°C [16]. Para el guaraná en polvo [20] el valor de humedad en la monocapa estimado por el modelo GAB a la temperatura de 25°C fue relativamente bajo, 5,31%

db, valor que está dentro del rango encontrado en este estudio. Es importante destacar que el valor X_m corresponde a la humedad segura, para que el producto tenga la máxima estabilidad en las etapas de acondicionamiento, almacenamiento, distribución y consumo [20].

Se observó que el parámetro C, del modelo de GAB, que representa el total de calor de sorción de la primera capa y tiene un significado físico relacionado con el efecto de la temperatura, mostró a temperaturas entre 20 y 40°C una tendencia a disminuir con el aumento de la temperatura, comportamiento similar al observado en las isothermas de la uva a temperaturas entre 15 y 60°C [21]. Un valor de $C = 11,5$ se encontró cuando se ajustó el modelo de GAB a la isoterma de adsorción a 30°C, de la pulpa de kiwi liofilizada [22], siendo este valor más bajo que el del polvo tipo A ($C = 19,0232$) a 30°C.

El parámetro K, que se introdujo en el modelo de GAB para medir la diferencia de potencial químico de las moléculas de agua en la región de múltiples capas, y del agua pura [23] y es una constante relacionada al calor de sorción de multicapas, presenta un aumento en sus valores al aumentar la temperatura. Patrón similar se observó para las isothermas de adsorción del jugo de tomate liofilizado a temperaturas de 20, 25, 30 y 35°C [24].

A temperaturas de 10 a 30°C, los valores de K fueron inferiores a 1.0 a temperaturas de 10 a 30°C y aproximadamente de 1,0 a 40°C. Cuando $K = 1$ en $a_w = 1$ la humedad de equilibrio tiende a valores infinitos, lo

que representan una inconsistencia física que impide la aplicación del modelo de GAB para la actividad de agua igual a la unidad [25]. El rango de aplicación del modelo de GAB es para a_w entre 0,1 y 0,9 [26], donde se encuadran los datos experimentales de la cereza de cayena en polvo de tipo A. Cuando K es igual a la unidad el modelo de GAB se reduce al modelo de BET con dos parámetros [27]. A temperaturas de 10 a 40°C, los valores de K variaron de 0.85 a 0.99 para las isothermas de adsorción de jobo en polvo, obtenido por la deshidratación en secador de aspersión de una solución de pulpa de jobo, con 7,5% de maltodextrina y 7,5% de almidón modificado (Snow flake®) [16]. Para las isothermas de adsorción a 25°C, muestras de polvo de remolacha, calabaza y zanahoria [15] se encontraron valores de K 0.13, 0.85 y 0.77 respectivamente, siendo inferiores a los reportados en este trabajo.

En los ajustes realizados con el modelo de Peleg, las constantes k_1 , N_1 , N_2 y k_2 mostraron una tendencia al aumento con el incremento de la temperatura. Para la acerola en polvo los parámetros n_1 y n_2 del mismo modelo, solo presentaron aumento de sus valores entre las temperaturas de 25 y 30°C [28].

En los ajustes realizados en el modelo empírico Smith, se observó que la constante **b**, a temperatura entre 10 y 30°C, tiende a decrecer al aumentar la temperatura. Comportamiento similar fue reportado para esta constante en el polvo de acerola a temperaturas de 25 a 30°C [29].

Al evaluar los ajustes por el modelo Halsey modificado, se observó que con el aumento de la temperatura, el parámetro c tiende a disminuir.

La constante a del modelo de Dey & Nelson mostró una tendencia decreciente con el aumento de la temperatura en todo el rango estudiado. También la constante b mostró tendencia similar entre el rango de 10 y 30°C, pero a 40°C su valor fue similar al obtenido a 10°C. Para las isotermas de adsorción de piña deshidratada a 20, 30, 40 e 50 oC, se observó un incremento de las constantes a y b de este modelo con el aumento de la temperatura [30].

Se puede observar que en el modelo de Sigma-CECAF al aumentar la temperatura entre 10 y 30°C el valor de la constante c decrece.

La Tabla 5 muestra los parámetros de los modelos utilizados para los ajustes de las isotermas de adsorción de humedad en polvo tipo B a las cuatro temperaturas, las desviaciones y los coeficientes de determinación.

A diferencia del polvo A, para el polvo tipo B el modelo de Peleg, a todas las temperaturas trabajadas, representó satisfactoriamente las isotermas de adsorción; presentando los más altos coeficientes de determinación ($>0,99$) y las desviaciones más bajas ($<6,5\%$). Los mejores ajustes para las isotermas de adsorción de pimentón en polvo a temperaturas de 20, 30 y 40°C se encontraron con el modelo de Peleg [31]. Los modelos de GAB, modificados Halsey,

Smith y Sigma-CECAF pueden describir satisfactoriamente el comportamiento higroscópico de la cereza de cayena en polvo tipo B, presentando coeficientes de determinación superiores a 0,95 y las desviaciones inferiores a 9,0%.

Los ajustes obtenidos con el modelo Day & Nelson, cuando se comparan con los otros modelos, presentan las desviaciones medias más altas, excepto a la temperatura de 10°C, en donde el valor de P es inferior al del modelo de Halsey modificado. Pero aun así, este modelo se puede utilizar para estimar las isotermas de polvo de tipo B ya que los valores de P fueron inferiores a 10% a temperaturas de 10, 20 y 40°C.

Al evaluar los parámetros de los modelo, se puede constatar que los valores de humedad en la monocapa (X_m) del modelo de GAB disminuyen con el aumento de la temperatura y superan los valores de X_m del polvo tipo A encontrándose, dentro del valor máximo de X_m reportado para alimentos, 10% bs [32].

Para el copoazú en polvo [33] fue repostado que X_m disminuye entre las temperaturas de 25 y 35°C, con valores respectivos de 3,99% y 3,39% bs, inferiores a los del polvo tipo B. En el ajuste del Modelo de GAB a la isoterma de adsorción de humedad a 25°C, del Camu Camu en polvo- [34], liofilizado con adición de 30% de maltodextrina, fue reportado un valor de $X_m = 6,4\%$ bs, siendo este valor próximo al obtenido en el mismo rango de temperatura, del polvo tipo B de este trabajo.

TABLA 5. Parámetros de los modelos ajustados a las isotermas de adsorción de cereza de cayena del polvo tipo B.

Modelos	Parámetros	Temperatura (°C)			
		10°C	20°C	30°C	40°C
GAB	X_m	10,1744	6,9239	6,0508	5,7581
	C	4,7084	15,7563	47,9896	22,0289
	K	0,8794	0,9596	0,9897	1,0022
	R^2	0,9939	0,9986	0,9799	0,9766
	P (%)	4,92	2,09	8,15	7,94
Peleg	K_1	49,3281	22,4676	202,4059	24,4025
	n_1	3,3009	0,8189	14,2445	1,0049
	K_2	8,9052	73,3408	23,6184	429,7868
	n_2	0,0947	8,7930	0,8790	17,6571
	R^2	0,9982	0,9994	0,9917	0,9921
	P (%)	2,05	1,59	5,13	6,36
Halsey modificado	a	52,5997	8,9981	67,1440	87,8380
	b	-4,9038	-0,2987	-2,1426	-2,1342
	c	0,6754	0,7459	0,7710	0,8329
	R^2	0,9859	0,9986	0,9782	0,9638
	P (%)	6,79	1,66	6,48	8,60
Smith	a	1,5388	0,9845	1,1983	0,4456
	b	18,7592	17,8946	17,2982	17,3350
	R^2	0,9918	0,9807	0,9552	0,9558
	P (%)	5,43	7,95	8,62	8,63
Day & Nelson	a	3,0137	2,9306	2,9156	2,8708
	b	0,9408	0,9858	0,9643	1,0046
	R^2	0,9893	0,9785	0,9521	0,9553
	P (%)	6,67	9,93	10,28	9,64
Sigma-Copace	a	-14,1751	-20,3475	-6,5872	-9,6484
	b	-1,4390	-1,0160	-0,2184	-0,2359
	c	1,4595	1,5415	1,5349	1,6053
	R^2	0,9972	0,9912	0,9644	0,9630
	P (%)	2,69	4,17	7,06	6,99

Los valores de C del modelo de GAB se incrementaron con el aumento de la temperatura entre 10 y 30°C, con valores que oscilan entre 4,7084 y 47.9896, respectivamente, comportamiento similar al observado para las isotermas de proteína de soja a 10 y 40°C [35]. Se observó un comportamiento diferente en las muestras de polvo de cereza de

cayena, presentando a 10 y 20°C, valores de C menores en el polvo de tipo B que el polvo tipo A y mayores a 30 y 40°C. En el ajuste de la isoterma a 30°C de fresa liofilizada [36] se encontró un valor de C igual a 7,0. Valor inferior a los reportados para la cereza de cayena en polvo a las mismas temperaturas.

Del mismo modo como ocurrió para el polvo tipo A, en el tipo B los valores de K del modelo de GAB, a temperaturas de 10 y 30°C, fueron inferiores a la unidad y de aproximadamente 1,0 a 40°C, valores dentro de los rangos obtenidos para las isotermas de fécula de papa a temperaturas entre 2 y 67°C [37]. Estos autores también reportaron que los valores de K generalmente están en el intervalo entre 0,7 y 1. Otros investigadores, sin embargo, encontraron valores de K por encima de 1,0, especialmente para las isotermas a temperaturas elevadas, como para el plátano liofilizado [38] que mostró un valor de $K = 1.4$ para la isoterma de adsorción determinada a 40°C.

En el ajuste con el modelo de Peleg se observó que las constantes del modelo no mostraron tendencia a crecer o decrecer con el aumento de la temperatura, diferente a lo observado en el ajuste del modelo Peleg a las isotermas de adsorción de humedad de muestras de carqueja deshidratadas a 30, 45 y 60°C [39], en donde los valores de las constantes K_1 , K_2 , n_1 y n_2 decrecían con el aumento de la temperatura, presentando coeficientes de determinación iguales a 0,993, 0,997 y 0,999%, respectivamente. Las isotermas de adsorción de humedad del extracto puro de polvo de inulina de achicoria [40], deshidratada en equipo de secado por atomización a temperaturas de 25°C, 35°C y 45°C, presentaron incremento de las constantes K_1 y n_1 y una disminución de las constantes K_2 y N_2 al aumentar la temperatura.

Al evaluar los parámetros del modelo de Halsey modificado, se observó que la constante a presentó en general tendencia a acrecentarse con el aumento de la temperatura, al igual que la constante c . Los valores de los parámetros c fueron inferiores a los determinados para las isotermas de adsorción higo seco [9].

En los ajustes con el modelo de Smith, a 10 y 30°C, la constante b mostró tendencia a disminuir al aumentar la temperatura. Para las isotermas de adsorción de humedad del pimentón en polvo a 20, 30 y 40°C [31], se observó que al aumentar la temperatura la constante a mostró una tendencia a disminuir, comportamiento contrario al presentado por la constante b que mostró un aumento a 20 y 30°C y se mantuvo estable a 30 y 40°C.

Por otro lado, del modelo de Sigma-Copace, solo la constante b presentó una reducción, lo que puede estar asociado al aumento de la temperatura. Las constantes b y c a pesar de variar entre temperaturas no presentaron, con el calentamiento, una clara tendencia a aumentar o disminuir.

En las Figuras 1 y 2 se observan las isotermas de adsorción de humedad de los polvos tipos A y B, ajustadas con el modelo de Peleg a 10, 20, 30 y 40°C.

En la figura 1 se puede constatar que en las actividades de agua por debajo de 0,8 la curva correspondiente a la temperatura de 40°C se sitúa debajo de las demás, presentando humedades de equilibrio menores. Para a_w encima de 0,8, esta tendencia se invierte y la

curva correspondiente a 40°C cruza las demás y se sitúa por encima de todas. En todo el rango de a_w estudiada las curvas correspondientes a 20 y 30°C se superponen, con una tendencia de dispersión sola a partir de $a_w = 0,9$. Un comportamiento diferente es observado en la curva de 10°C, la cual se cruza con otras curvas en varias y diferentes actividades de agua. En la pulpa de la cereza de cayena seca producida por el método de secado de espuma, se verificó la superposición de las isothermas obtenidas a 20 y 30°C [41].

La Figura 2 muestra que las curvas relacionadas con la temperaturas de 20 y 30°C están superpuestas a las actividades de agua en el rango de 0 a 0,65. En las actividades de agua entre 0,60 y 0,80 se observa una disminución de la humedad de equilibrio al aumentar la temperatura, mientras que para actividades de agua por encima de 0,8 las curvas se invierten, mostrando que en las curvas de las temperaturas más altas los valores de humedad de equilibrio son mayores.

Este mismo cambio se observó en el estudio de las isothermas de adsorción de humedad, ajustadas por el modelo de Peleg, de la pulpa de umbu en polvo [28].

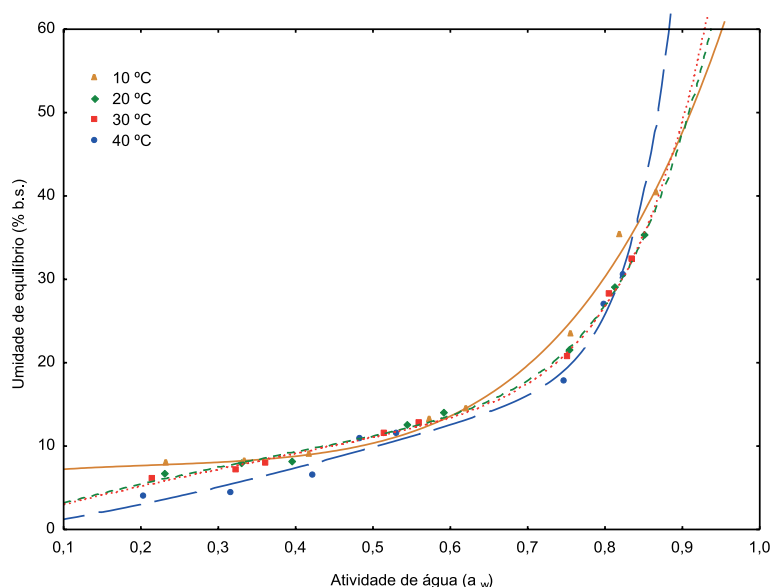


FIGURA 1. Isothermas de adsorción de humedad de la cereza de cayena del polvo tipo A, ajustado con el modelo de Peleg.

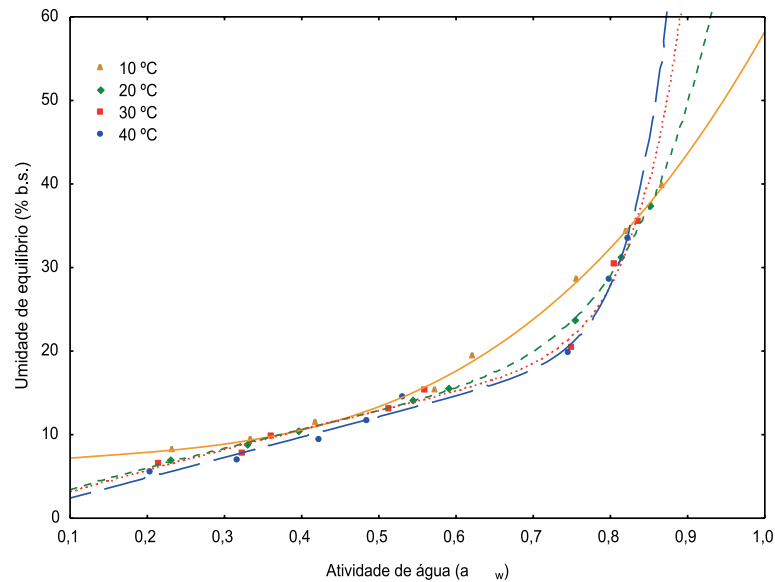


FIGURA 2. Isotermas de adsorción de humedad de cereza de cayena en polvo del tipo B, ajustada con el modelo de Peleg

4. Conclusiones

Para los polvos tipos A y B de la cereza de cayena, el modelo de Peleg fue, en general, el que mejor representó las isotermas de adsorción de humedad, seguidos por los modelos de GAB, Halsey modificado y Sigma-Copace.

Referencias

- [1] Nascimento, S.S. Fomento à Produção e à Pesquisa da Mangaba e outras Fruteiras Potenciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A CULTURA DA MANGABA, 1., 2003, Aracaju. **Anais...** Aracaju: EMBRAPA. CD.
- [2] Tyler, V. E. Phytomedicines: back to the future. **Journal of Natural Products**, v. 62, p. 1589-1592, 1999.
- [3] Gomes, R. P. **Fruticultura brasileira**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1975. 446 p.
- [4] Furtado, B. F.; Corrêa, P. C.; Silva, F. S. da. Efeito do estágio de maturação no comportamento mecânico de frutos de pitanga (*Eugenia uniflora* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32. Goiânia, 2003. **Anais...** Goiânia: SBEA. CD.
- [5] Cavalcante, M. L. **Composição de carotenóides e valor de vitamina A na pitanga (*Eugenia uniflora*) e acerola (*Malpighia glabra*)**. Rio de Janeiro, 1991, 73p. Dissertação (Mestre em Nutrição), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- [6] Greenspan, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National of Bur. Of Standards**, v. 81, n. 1, p. 89-96, 1977.

- [7] Lomauro, C. J.; Bakshi, A. S.; Labuza, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part II: Milk, coffee, tea, nuts, oilseeds, spices and starchy foods. **Lebensmittel – Wissenschaft & Technologie**, v. 18, n. 1, p. 118-124, 1985.
- [8] Peleg, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Processing Engineering**, v. 16, n. 1, p. 21-37, 1993.
- [9] Lahsasni, S.; Kouhila, M.; Mahrouz, M. Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 1, p. 249-261, 2004.
- [10] Chirife, J.; Iglesias, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 – a review. **Journal of Food Technology**, v. 13, n. 3, p. 159-174, 1978.
- [11] Boente, G. González, H. H. L.; Martínez, E. Pollio, M. L.; Resnik, S. L. Sorption isotherms of corn-study of mathematical models. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 115-128, 1995.
- [12] Corrêa, P. C.; Afonso Jr., P. C.; Stringheta, P. C.; Cardoso, J. B. Estudo do fenômeno de adsorção de água e seleção de modelos matemáticos para representar a higroscopicidade do café solúvel. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p. 19-25, 2000.
- [13] Gomes, P. M. de A.; Figueirêdo, R. M. F. De; Queiroz, A. J. de M. Caracterização e isothermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 4, n. 2, p. 157-165, 2002.
- [14] Pena, R. S.; Ribeiro, C. C.; Grandi, J. G. Aplicação de modelos matemáticos bi e tri paramétricos na predição de isothermas de adsorção de umidade do guaraná (*Paullinia cupana*) em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 20, n. 1, p. 8-11, 2000.
- [15] Costa, J. M. C.; Medeiros, M. F. D.; Mata, A. L. M. L. Isothermas de adsorção de pós de beterraba (*Beta vulgaris* L.), abóbora (*16nternaci moschata*) e cenoura (*Daucus carota*) obtidos pelo processo de secagem em leito de jorro: estudo comparativo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 34, n. 1, 2003.
- [16] Silva, Y. C.; Cavalcanti Mata, M. E. R. M.; Duarte, M. E. M. Atividade de água de cajá em pó microencapsulado com amido modificado: Estudo de dois modelos matemáticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-COLHEITA DE FRUTOS TROPICAIS, 1., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBPCFT. CD.
- [17] Park, K. J.; Bin, A.; Brod, F. P. R. Obtenção das isothermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.

- [18] Kuye, A.; Sanni, L. O. Analysis of the equilibrium moisture sorption data for lafun and soyflour. **Journal of Modeling, Design and Management of Engineering Systems**, v. 1, n. 1, p. 63-71, 2002.
- [19] Iglesias, H. A.; Chirife, J. Bet monolayer in dehydrated foods and food components. **Lebensmittel – Wissenschaft & Technologie**, v. 9, n. 2, p. 107-113, 1976.
- [20] Pena, R. S.; Ribeiro, C. C.; Grandi, J. G. Levantamento de isoterma de adsorção de umidade à 25°C, do guaraná (*Paullinia cupana*) em pó, obtido por atomização em spray drier. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 10., 1994, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABEQ, v.2.
- [21] Maroulis, Z. B.; Tsami, E.; Marinou-Kouris, D. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. **Journal of Food Engineering**, v.7, n. 1, p. 63-78, 1988.
- [22] Moraga, G.; Martínez-Navarrete, A.; Chiralt, A. Water sorption isotherms and phase transitions in kiwifruit. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 2, p. 147-156, 2006.
- [23] Yanniotis, S. A new method for interpolating and extrapolating water activity data. **Journal of Food Engineering**, v. 21, n. 1, p. 81-96, 1994.
- [24] Orrego-Alzate, C. E.; Giraldo-Gómez, G. I.; González-Jiménez, M. E. Calorimetric study and adsorption isotherms of freeze-dried tomato tree (*Cyphomandra betacea* (Cav) Send) juice. In: MERCOSUR CONGRESS ON CHEMICAL ENGINEERING, 2., MERCOSUR CONGRESS ON PROCESS SYSTEMS ENGINEERING, 4., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ENPROMER. CD.
- [25] Rahman, M. S.; Perera, C. O.; Thebaud, C. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. **Food Research Internacional**, v. 30, n. 7, p. 485-491, 1998.
- [26] Chaves, M. G.; Sgroppo, S. C.; Avanza, J. R. Isotermas de adsorción de berenjenas deshidratadas. **Comunicaciones Científicas y Tecnológicas**, Universidade Nacional del Nordeste, Resumen, E-081, p.1-4, 2004.
- [27] Oliveira, M. M.; Campos, A. R. N.; Gomes, J. P.; Silva, F. L. H. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 565-569, 2005.
- [28] Galdino, P. O. **Desidratação de polpa de umbu**. Campina Grande, 2003, 92p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).
- [29] Gomes, P. M. de A.; Figueirêdo, R. M. F. de; Queiroz, A. J. de M. Avaliação de modelos matemáticos de isotermas de sorção de umidade em acerola em pó. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32. Goiânia, 2003. **Anais...**Goiânia: SBEA. CD.

- [30] Hossain, M. D.; Bala, B. K.; Hossain, M. A.; Mondol, M. R. A. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 103-107, 2001.
- [31] Arlindo, D. M. **Armazenabilidade de pimentão em pó**. Campina Grande, 2005, 89P. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).
- [32] Tsami, E.; Marinos-Kouris, D.; Maroulis, Z. B. Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. **Journal of Food Science**, v. 55, n. 1, p. 1594-1597, 1625, 1990.
- [33] Medeiros, M. L.; Ayrosa, A. M. I. B.; Pitombo, R. N. M.; Lannes, S. C. S. Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products. **Journal of Food Engineering**, v. 73, p. 402-406, 2006.
- [34] Silva, M. A.; Sobral, P. J. A.; Kieckbusch, T. G. State diagrams of freeze-dried camu-camu (*Myrciaria dubia* (HBK) Mc Vaugh) pulp with and without maltodextrin addition. **Journal of Food Engineering**, v.77, n.3, p.426-432, 2006.
- [35] Vencato, C. E.; Marczak, L. F. D.; Noreña, C. P. Z.; Kitawawa, S. Moisture sorption isotherms of organic soy protein (NGMO). In: MERCOSUR CONGRESS ON CHEMICAL ENGINEERING, 2., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ENPROMER. CD.
- [36] Moraga, G.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment. **Journal of Food Engineering**, v. 62, n. 4, p. 315-321, 2004.
- [37] Viollaz, P. E.; Rovedo, C. O. Equilibrium sorption isotherms and thermodynamic properties of starch and gluten. **Journal of Food Engineering**, v. 40, n. 27, p. 287-292, 1999.
- [38] Silva, F. **Avaliação do teor e da composição química do óleo essencial de plantas medicinais submetidas a processos de secagem e armazenamento**. Campinas, 2005, 152p. Tese (Doutor em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- [39] Nogueira, R. I. **Processo de obtenção de inulina de chicória (*Cichorium intybus*) em pó**. 2002. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [41] Alexandre, H. V. **Secagem da polpa de pitanga e armazenamento do pó**. Campina Grande, 2005, 108p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Agradecimientos

Loa autores agradecen a Corn Products Brasil por la donación de la maltodextrina. A Luty Gomezcaeres P por la traducción al español.