

Caracterización del proceso de sorción de humedad en semillas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) a través de modelos matemáticos

Characterization of the moisture sorption process in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds through mathematical models

Yaisely Orquídea Hernández Fernández
 Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura
 Tropical "Alejandro de Humboldt", Cuba
 yaisely01@gmail.com
 Randers José Socorro Toledo
 Instituto de Investigaciones de Granos, Cuba
 Michely Vega León
 Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura
 Tropical "Alejandro de Humboldt", Cuba
 Eliezer Ferrer Tamayo
 Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura
 Tropical "Alejandro de Humboldt", Cuba
 Rayniel Cabrales Nohay
 Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura
 Tropical "Alejandro de Humboldt", Cuba
 Leonor Pérez Rodríguez
 Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura
 Tropical "Alejandro de Humboldt", Cuba

Recepción: 30 Octubre 2023
 Aprobación: 20 Noviembre 2023
 Publicación: 31 Diciembre 2023



Acceso abierto diamante

Resumen

El conocimiento de las propiedades higroscópicas de semillas ortodoxas como el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) resulta de gran valor para su adecuada conservación a largo plazo, debido a que esta propiedad es el factor abiótico que más incide sobre la calidad con respecto a la temperatura. El objetivo de este trabajo consistió en describir el proceso de sorción de moléculas de agua en siete variedades de frijol común. El experimento consistió en dejar alcanzar el equilibrio una muestra conocida de semillas de las variedades CUFIG 48, La Cuba 154, CUFIG 110, CUL 156, CUFIG 145, Engañador y Quivicán que se encontraban en recipientes herméticamente cerrados con diferentes soluciones salinas saturadas a temperatura ambiente. Los datos generados de contenidos de humedad de equilibrio se ajustaron mediante las ecuaciones de: Adam y Shove, Peleg, Halsey, GAB, BET, Caurie y D'Arcy-Watt. Los modelos de Peleg, Halsey, BET, DAW y Adam y Shove caracterizaron el proceso de adsorción y establecieron el rango de contenido de humedad que deben presentar las variedades analizadas para poder almacenarse y obtener una máxima durabilidad a temperatura ambiente.

Palabras clave: conservación, modelación, equilibrio higroscópico, frijol común, sorción.

Notas de autor

* Autor para la correspondencia: quimicapost@inifat.co.cu; yaisely01@gmail.com

Abstract

Knowledge of the hygroscopic properties of orthodox seeds such as common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is of great value for their adequate long-term conservation, because this property is the abiotic factor that most affects quality with respect to temperature. The objective of this work was to describe the sorption process of water molecules in seven varieties of common bean. The experiment consisted of allowing a known sample of seeds of the varieties CUFIG 48, La Cuba 154, CUFIG 110, CUL 156, CUFIG 145, Engañador and Quivicán to reach equilibrium, which were in hermetically closed containers with different saturated saline solutions at room temperature. The data generated for equilibrium moisture contents were adjusted using the equations of: Adam and Shove, Peleg, Halsey, GAB, BET, Caurie and D'Arcy-Watt. The models of Peleg, Halsey, BET, DAW and Adam and Shove characterized the adsorption process and established the range of moisture content that the analyzed varieties must present in order to be stored and obtain maximum durability at room temperature.

Keywords: conservation, modeling, hygroscopic equilibrium, common bean, sorption.

INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad influye sobre varios factores fisiológicos esenciales para el control de la calidad del grano (Kangue y Boicet, 2020). Es por ello que no hay un solo método de determinación de humedad satisfactorio para todos los materiales biológicos, donde la técnica más eficiente depende de la composición química y la estructura del material evaluado.

La humedad de una semilla u otro material varía en función del ambiente que lo rodea. Por lo cual los procesos biológicos que ocurren durante la exposición a una atmósfera determinada pueden cambiar según la variedad, las características morfológicas e incluso de la composición química.

Por otro lado, la higroscopicidad es la capacidad de un producto de absorber o ceder humedad al aire hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente. Es por ello, que el conocimiento de las propiedades higroscópicas de semillas ortodoxas como el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L), resulte de gran valor para su adecuada conservación a largo plazo (Hernández *et al.*, 2021), debido a que esta propiedad es el factor abiótico que más incide sobre la calidad con respecto a la temperatura.

El modelado de los procesos de sorción no es sencillo y aún en la actualidad se continúan las investigaciones en este campo. Esto se debe principalmente a la complejidad inherente al proceso simultáneo de transferencia de masa y energía que ocurre, así como, a la variabilidad de los compuestos biológicos sobre los que se aplican estas funciones matemáticas (Morales *et al.*, 2019).

Los modelos empíricos, semiempíricos y experimentales, son representaciones de los procesos reales con distintos niveles de descripción que relacionan siempre el carácter del fenómeno físico, en este caso, la sorción de humedad (Guillermé y Nicolin, 2020). Su ajuste matemático depende de los parámetros termodinámicos, la especie vegetal en estudio, su composición química y los aspectos botánicos. De ahí la importancia que se realice de manera individual.

El objetivo de este trabajo consistió en describir el proceso de sorción de moléculas de agua en siete variedades de frijol común a temperatura ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de Biología y tecnología Postcosecha del Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt" (INIFAT), ubicado en Santiago de las Vegas, municipio Boyeros, La Habana, Cuba.

En el estudio se emplearon siete variedades de frijol (Foto 1). El contenido de humedad inicial de las semillas se determinó por triplicado, según el método gravimétrico (2 horas a 130 °C) y para ello se utilizó una balanza analítica de marca OHAUS Explorer con una precisión de 0,0001 g y una estufa de marca MEMMERR.

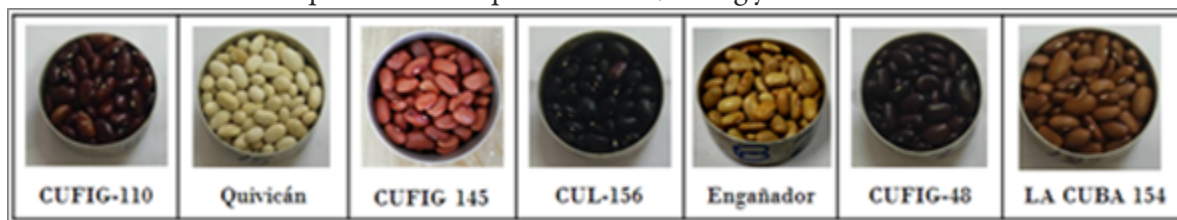


Foto 1
Variedades de frijol empleadas en el estudio

Desarrollo experimental

En la determinación de la isoterma de sorción se utilizó la técnica analítica de equilibrio higroscópico. Para ello se colocaron $2,15 \pm 1,0$ g semillas de frijol de cada variedad por triplicado en desecadoras con diferentes soluciones salinas saturadas a la temperatura ambiental hasta alcanzar el equilibrio (Tabla 1). Se determinó el peso de la muestra diariamente, hasta que se obtuvo un peso constante y posteriormente se calcularon los contenidos de humedad mediante el método A.O.A.C. (1990).

Tabla 1
Soluciones salinas empleadas el equilibrio higroscópico.

Solución salina	Humedad relativa (%)
Cloruro de litio	11,2
Cloruro de magnesio	33
Nitrato de magnesio/Nitrato de calcio	53
Cloruro de sodio	75
Cloruro de potasio	82,6
Sulfato de potasio	92

Los datos experimentales de equilibrio se ajustaron mediante las ecuaciones de la Tabla 2. La calidad del ajuste se evaluó a partir del coeficiente de correlación lineal (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (% E).

Tabla 2
Modelos matemáticos aplicados a las isothermas de adsorción.

No.	Ecuación	Nombre del modelo
1	$X_e = A * a_w^B + C * a_w^D$	Peleg
2	$X_e = \left(\frac{-A}{\ln a_w}\right)^{\frac{1}{B}}$	Halsey
3	$X_e = \frac{a_w k C X_m}{(1 - k a_w)(1 + (C - 1) k a_w)}$	GAB
4	$X_e = \frac{a_w X_m C}{(1 - a_w)(1 + a_w(C - 1))}$	BET
5	$X_e = a + b * a_w + c * a_w^2 + d * a_w^3$	Adam y Shove
6	$X_e = e^{\left[(a_w) \ln(V) - \left[\frac{1}{4.5 X_s}\right]\right]}$	Caurie
7	$X_e = \frac{KK' a_w}{1 + K a_w} + (c * a_w) + \frac{kk' a_w}{1 - k a_w}$	D' Arcy-Watt

Fuente: Cárdenas y Ramírez, 2021.

X_e contenido de humedad en equilibrio ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{ ms}$).

a_w actividad de agua.

X_m contenido de humedad de la monocapa ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{ ms}$) representa la disponibilidad de sitios activos para la sorción de agua en el material y se considera como el valor con el cual el material es más estable.

X_s constante de seguridad ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{ ms}$) representa la humedad con la cual se logra la máxima estabilidad durante la vida de anaquel.

K y K' del modelo de DAW representan el número de sitios de adsorción con enlaces fuertes.

k , k' del modelo de DAW cantidad de sitios de adsorción con enlaces multimoleculares.

A del modelo de Peleg representa la transferencia de masa.

C del modelo de Peleg representa la capacidad de adsorción.

a , b , c , d , K , A , B , V , C , D constantes características del producto y relacionadas con el calor de adsorción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El equilibrio higroscópico se alcanzó cuando cesó el intercambio de energía entre las semillas y el ambiente generado por la solución salina. De esta forma el contenido de humedad llegó a un valor de equilibrio (X_e), para cada valor de presión relativa del vapor de agua que ejerció la atmósfera.

Los procesos de adsorción de moléculas de agua ocurren cuando la atmósfera circundante presenta una baja capacidad de adsorción. En este caso (Tabla 3), las variedades evaluadas a la temperatura ambiental adsorbieron la humedad del medio hasta alcanzar el estado de equilibrio, debido a que presentaron una menor presión de vapor que la solución salina a las cuales se expusieron.

Tabla 3
Contenido de humedad de equilibrio a temperatura ambiente.

Aw	Contenido de humedad de equilibrio (g·g⁻¹ ms)						
	CUFIG 48	La Cuba 154	CUFIG 110	CUL 156	CUFIG 145	Engañador	Quivicán
0,112	0,0100	0,0262	0,0279	0,0431	0,0745	0,1203	0,0622
0,33	0,0677	0,0737	0,0639	0,0821	0,0849	0,1449	0,0684
0,53	0,0828	0,1149	0,0453	0,0936	0,1992	0,1199	-
0,75	0,3499	0,1547	0,1452	0,1292	0,1516	0,1282	0,0650
0,85	0,3561	0,2487	0,2040	0,1769	0,1947	0,1441	0,0865
0,92	0,4965	0,4808	0,5700	0,3918	0,3519	0,1309	0,1513
Equilibrio	144 h	168 h	238 h	118 h	190 h	312 h	312 h

En la variedad CUFIG 48 se observaron los mayores valores de contenido de humedad de equilibrio con relación a las demás variedades para igual valor de humedad relativa, lo cual indicó un menor intercambio de energía en estas semillas. Esto pudiera estar relacionado con el contenido de grasa del grano, puesto que los lípidos de acuerdo a sus propiedades hidrofóbicas, provocan una menor interacción entre la superficie del polímero y las moléculas de vapor de agua, lo cual está íntimamente relacionado con los valores de entalpía.

Hernández *et al.* (2021) comparando variedades de frijol plantea que un aumento del contenido de humedad puede deberse a una menor densidad real que entre otras causas está condicionada por diferencias en la presencia y distribución de poros y capilares en las semillas.

Los valores de humedad de equilibrio de todas las semillas fueron superiores a los reportados por Socorro *et al.* (2010) para este grano. Las diferencias pudieron estar asociadas a la temperatura del estudio y a las características intrínsecas de las variedades evaluadas.

En los tiempos de estabilización se evidenció que los periodos para alcanzar el equilibrio no siempre fue el mismo. No obstante, estuvieron por encima de los reportados por Socorro *et al.* (2010) para semillas de frijol y por debajo de los reportados por Hernández *et al.* (2021) para igual cultivo. Esto puede estar asociado a la temperatura, al contenido de humedad inicial y/o las características morfológicas de cada semilla.

Se ajustaron los datos experimentales a diferentes modelos matemáticos en función de los valores de % E y R² como se muestran en la Figura 1 y en la Tabla 4. Según la clasificación de Brunauer *et al.* (1940) se obtuvo para las semillas de las variedades Engañador y Quivicán isothermas de Tipo II, mientras que para el resto fue de Tipo III.

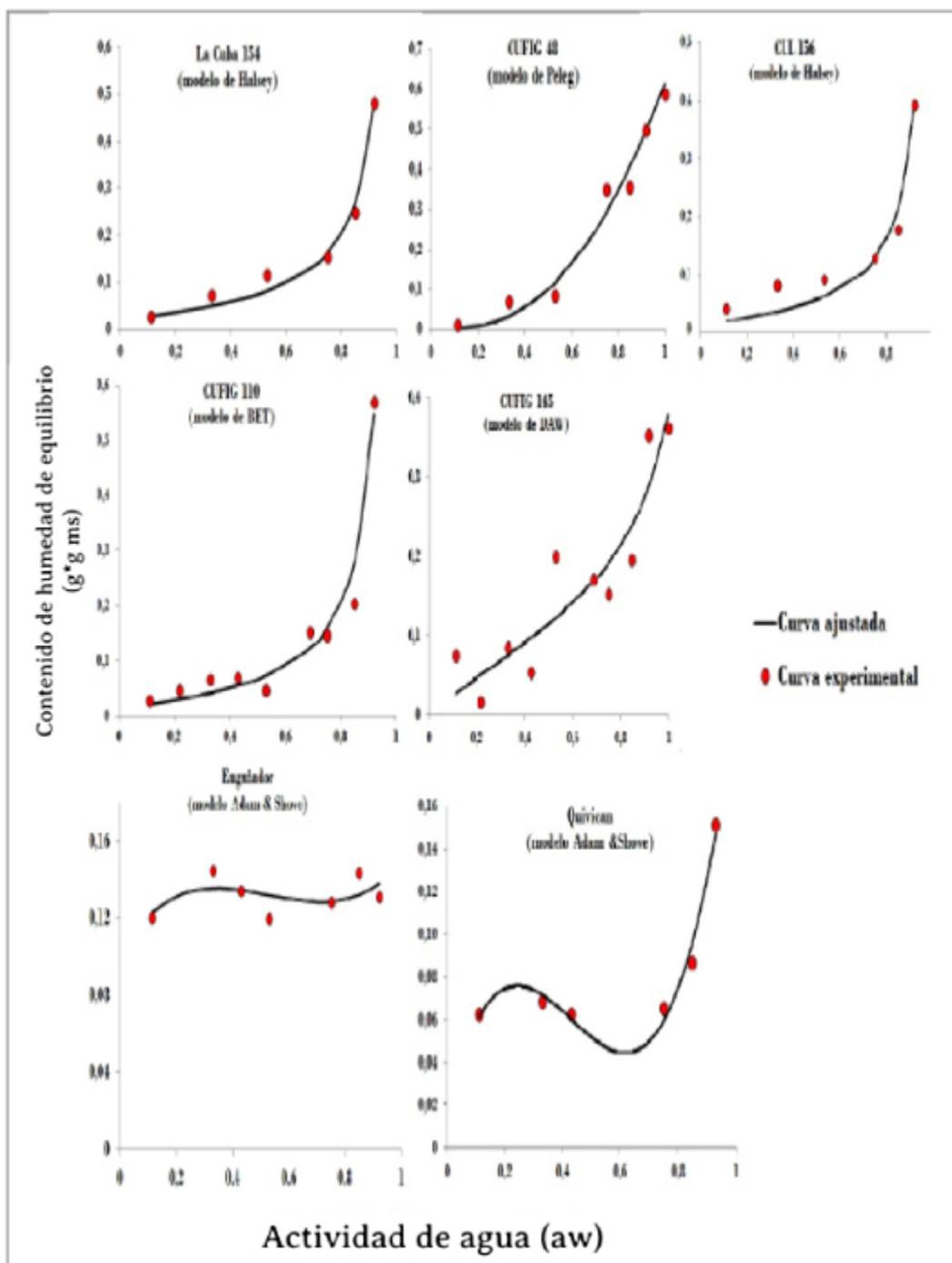


Figura 1
Isotermas de adsorción de cada semilla ajustada a cada modelo de mejor ajuste.

Tabla 4
Ajuste matemático de los datos experimentales.

Variedad	Modelos matemáticos						
	GAB	Caurie	Halsey	Peleg	BET	DAW	A&S
CUFIG 48	K= 0,80 C= 0,486 X _m = 0,214 R ² =0,90 %E=18,3	V=33,4 X _s =0,055 R ² =0,96 %E=38,9	A=0,0474 B=1,1051 R ² =0,82 %E=52,4	A=0,804 C=2,794 B= -0,189 D=3,606 R²=0,97 %E=30,2	C=1 X _m =0,0573 R ² =0,70 %E=46,0	c=-0,02 K=1,60 K'= 0,36 k=0,846 k'=0,055 R ² =0,87 %E=114,2	a= -0,22 b= 2,5566 c= -6,1957 d= 4,6386 R ² =0,77 %E=45,2
La Cuba 154	K=0,76 C=0,49 X _m =0,216 R ² =0,93 %E=28,5	V=27,1 X _s =0,055 R ² =0,93 %E=17,6	A=0,0364 B=1,1413 R²=0,98 %E=13,5	A=0,684 C=2,794 B=-0,189 D=2,492 R ² =0,91 %E=41,4	C=1 X _m =0,0421 R ² =0,97 %E=21,9	c=-0,02 K=1,60 K'= 0,36 k=0,846 k'=0,055 R ² =0,81 %E=61,0	a= -0,3 b= 2,5566 c= -6,2 d= 4,6386 R ² =0,71 %E=95,4
CUFIG 110	K= 0,80 C= 0,43 X _m = 0,223 R ² =0,93 %E=42,4	V=34,4 X _s =0,055 R ² =0,87 %E=42,8	A=0,0402 B=1,1051 R ² =0,95 %E=23,3	A=0,776 C=3,432 B=-0,1 D=2,209 R ² =0,90 %E=56,8	C=1 X_m=0,0457 R²=0,96 %E=27,3	c=-0,01 K=0,32 K'= 0,44 k=0,928 k'=0,055 R ² =0,92 %E=34,3	a= -0.1273 b= 1.7333 c= -4.6787 d= 3.8256 R ² =0.96 %E=14,6

Tabla 4 (cont.)
Ajuste matemático de los datos experimentales.

Variedad	Modelos matemáticos						
	GAB	Caurie	Halsey	Peleg	BET	DAW	A&S
CUL 156	K= 0,71 C= 0,48 $X_m=0,229$ $R^2=0,88$ %E=29,3	V=22 $X_s=0,055$ $R^2=0,88$ %E=26,3	A=0,0293 B=1,1161 $R^2=0,94$ %E=26,4	A=0,69 C=4,641 B=-0,257 D=7,467 $R^2=0,84$ %E=48,4	C=1,06 $X_m=0,0322$ $R^2=0,93$ %E=29,6	c=-0,01 K=0,59 K'= 0,41 k=0,823 k'=0,055 $R^2=0,84$ %E=29,15	a= -0,1774 b= 2,3509 c= -6,2466 d= 4,6386 $R^2=0.61$ %E=45,8
CUFIG 145	K= 0,69 C= 0,567 $X_m=0,229$ $R^2=0,79$ %E=33,9	V=22 $X_s=0,055$ $R^2=0,82$ %E=37,6	A=0,0240 B=1,3414 $R^2=0,74$ %E=41,2	A=0,655 C=3,134 B=-0,314 D=5,11 $R^2=0,73$ %E=41,2	C=1,36 $X_m=0,022$ $R^2=0,75$ %E=45,1	c= -0,01 K=0,50 K'= 0,35 k=0,821 k'=0,056 $R^2=0,84$ %E=37,6	a= 0.0288 b= 0.2086 c= -0.3500 d= 0.4790 $R^2=0,85$ %E=51,2
Engañador	K= 0,119 C= 7260,9 $X_m=0,123$ $R^2=0,02$ %E=6,24	V=5,41 $X_s=0,062$ $R^2= (-)$ %E=41,0	A=0,011 B=1,25 $R^2= (-)$ %E=33,8	A=0,655 C=2,183 B=-0,658 D=4,513 $R^2=0,58$ %E=36,9	C=3,161 $X_m=4,6*10^{-4}$ $R^2=0,65$ %E=20,9	c= -0,11 K= 1,52 K'= 0,41 k= 0,28 k'=0,055 $R^2=0,77$ %E=22,0	a= 0,1031 b= 0,2267 c= -0,4884 d= 0,3082 $R^2= 0,30$ %E=4,69

Tabla 4 (cont.)
Ajuste matemático de los datos experimentales.

Variedad	Modelos matemáticos						
	GAB	Caurie	Halsey	Peleg	BET	DAW	A&S
Quivicán				A=0,429		c= -0,01	
	K=0,3	V=1,60	A=6,7*10 ⁻³	C=1,784	C=2,161	K= -0,02	a= 0,0191
	C= 2,254	X _s =0,073	B=1,36	B= -0,325	X _m =1,3*10 ⁻³	K'= 0,31	b= 0,5358
	X _m = 0,19	R ² =0,04	R ² =0,80	D=2,759	R ² =0,92	k=0,821	c= -1,5347
	R ² =0,88	%E=18,8	%E=35,8	R ² =0,83	%E=26,2	k'=0,056	d= 1,1895
	%E=22,6			%E=41,8		R ² =0,82	R ² =0,95
						%E=48,4	%E=6,17

a_w actividad de agua.

A&S modelo de Adam y Shove.

DAW modelo de D'Arcy-Watt.

X_m contenido de humedad de la monocapa (g·g⁻¹ms) representa la disponibilidad de sitios activos para la sorción de agua en el material y se considera como el valor con el cual el material es más estable.

X_s constante de seguridad (g·g⁻¹ms) representa la humedad con la cual se logra la máxima estabilidad durante la vida de anaquel.

K y K' del modelo de DAW representan el número de sitios de adsorción con enlaces fuertes.

k, k' del modelo de DAW cantidad de sitios de adsorción con enlaces multimoleculares.

A del modelo de Peleg representa la transferencia de masa.

C del modelo de Peleg representa la capacidad de adsorción.

a, b, c, d, K, A, B, V, C, D constantes características del producto y relacionadas con el calor de adsorción.

Las isothermas de Tipo II como la obtenida para las semillas de las variedades Quivicán y Engañador, son conocidas como **Isotherma Sigmoidal** y se caracterizan por ser curvas cóncavas hacia arriba que toman en cuenta la existencia de multicapas en la superficie interna de un material. Al igual que lo planteado por He *et al.* (2021) se obtiene que los enlaces del agua en la monocapa en estas semillas son más fuertes. En cambio, las de Tipo III son conocidas como **Isotherma de Flory – Huggins** y son características de interacciones adsorbato-adsorbente baja y se asocia a una probable fuerza de adsorción pequeña en la monocapa. Este tipo de isoterma se genera cuando la energía de enlace que corresponde a dicha monocapa es menor que la energía de enlace entre las moléculas de agua (Noguera y Rivero, 2021).

La temperatura es un parámetro que interviene en la reducción de la higroscopicidad debido a modificaciones estructurales, físicas y texturales en este caso de la semilla. Es por ello que pueden las isothermas cambiar la forma de sigmoidal a parabólica, lo que implica que la curva de tipo III pase a ser de tipo II según la clasificación de Brunauer.

Las semillas de las leguminosas poseen una estructura compleja y en dependencia del grado de permeabilidad de la cubierta, las curvas de contenido de humedad en general pueden transitar entre dos formas estándar: cóncavas y sigmoidal. Si se tiene una cubierta impermeable, el agua ingresa por el hilio y atraviesa el surco hiliar y el tejido de la barra traqueidea para llegar al lóbulo radícula. Luego, el agua se distribuye en el espacio entre la cara interna de la cubierta de la semilla y el cotiledón (Hernández *et al.*, 2021).

Una vez que la cubierta de la semilla se hidrata desde el interior, se torna permeable y el agua penetra, no sólo a través del hilio sino que, también atraviesa la cubierta de la semilla por difusión. Finalmente, el cotiledón

se hidrata por difusión y capilaridad hasta alcanzar la concentración de equilibrio (Hernández *et al.*, 2021). En este caso, debido a la impermeabilidad de la cubierta, la cinética de hidratación muestra una fase de retardo y posee un comportamiento sigmoidal típico como se evidenció en las variedades de Quivicán y Engañador. En el caso contrario, cuando la cubierta de las semillas es permeable, la curva de la cinética de hidratación es del tipo cóncava como en el resto de las variedades evaluadas.

Las isotermas ajustadas mostraron un cambio en la pendiente a partir de 0,53 de actividad de agua, con un notable incremento en la humedad de equilibrio. Este comportamiento estuvo determinado por el aumento de la presión de vapor de agua en el aire en comparación con la superficie de la semilla. En esas condiciones éstas presentaron un menor número de moléculas de agua en relación al aire, lo cual propició mayor adsorción de moléculas de agua.

El contenido de humedad de seguridad (X_S) a partir de **Caurie**, estableció la humedad con la cual se lograría la máxima estabilidad durante la vida de anaquel del frijol. A partir de este modelo y el valor de contenido de humedad de equilibrio alcanzado en el punto de inflexión de las curvas, se estableció el rango de humedad que determinan las condiciones para el almacenamiento seguro para cada variedad a la temperatura ambiente evaluada. Obteniéndose así un intervalo seguro entre 0,04 y 0,1 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ms para todas las variedades en estudio.

Las diferencias entre los valores obtenidos y diferentes trabajos se atribuyen al tipo de semilla y a la variación en la composición química, principalmente el contenido de azúcares y grasas.

El modelo de **GAB** también facilitó el conocimiento de las interacciones entre las moléculas de agua de la multicapa con el adsorbente, a través del parámetro **K**. Su valor tiende a estar entre el de la energía de las moléculas en la monocapa y el del agua líquida. Al igual que lo planteado por He *et al.* (2021) respecto a este parámetro, se observó que los valores fueron inferiores a la unidad, lo que evidenció que las moléculas de agua que se encuentran después de la monocapa no están estructuradas en una multicapa.

El parámetro “**C**” del modelo de **GAB** permite relacionar la forma o clasificación de las isotermas de adsorción. Es por ello que siempre que **C** sea mayor que 2, indica que existe un punto de inflexión en la curva, lo cual es típico de la clasificación II. Sin embargo, cuando **C** es inferior a 2 es de Tipo III.

Por otro lado, el modelo de **Halsey** considera la condensación de las multicapas a una distancia relativamente grande de la superficie. El bajo valor obtenido para el parámetro **B** de acuerdo con lo planteado por Alpizar *et al.* (2018) y Castro (2022) indicó en las semillas CUL 156 y La Cuba 154 que las fuerzas de atracción predominantes son las de Van der Waals, lo que corroboró que en la composición química de estas semillas los enlaces mayoritarios son débiles.

El **modelo de Peleg** permite deducir el mecanismo de adsorción de vapor de agua y al igual que lo reportado para estas semillas por Hernández *et al.* (2021), dicho modelo describe el comportamiento del proceso de sorción para CUFIG 48. Los resultados obtenidos para el coeficiente **C** demuestran la alta capacidad de adsorción que presentó cada una de las variedades evaluadas por lo que se constató la existencia de adsorción superficial e interna en las semillas. El parámetro **A** de este modelo representa la transferencia de masa y evidenció que el mayor intercambio ocurrió en la CUFIG 48.

Esto representó para las variedades en estudio la existencia de una gran cantidad de agua unida a los sitios de adsorción de sólidos no solubles; así como, en solución acuosa compleja. Cabe significar que los resultados reafirman que es fundamental el secado posterior a la cosecha de estas semillas, debido a las características de higroscopicidad que presentan. No obstante, los valores obtenidos para el coeficiente **A** indican que dicho proceso de deshidratación como método de conservación puede realizarse en un corto periodo de tiempo, siendo más acelerado para la variedad CUFIG 48.

Los autores Kangue y Boicet (2020) plantean que la capacidad de absorción de agua está relacionada con el fenómeno de la frente dura, asociado con los tiempos de cocción prolongados, de modo que cuanto mayor es la capacidad de absorción, los tiempos de cocción son generalmente más cortos. Esta característica se puede utilizar en el proceso de selección de semillas para eliminar en las generaciones futuras aquellas líneas que

absorben menos cantidad de agua, lo que permite evaluar el grado de permeabilidad del grano de frijol durante el anegamiento y detectar el fenómeno de la frente dura, relacionada con tiempos de cocción prolongados.

De acuerdo con el **modelo de BET**, el ajuste de los datos de sorción permitió la estimación de la monocapa (X_m). El contenido de humedad de la monocapa es un parámetro crítico en alimento, ya que representa el contenido de humedad donde las reacciones de deterioro serán más bajas debido a la fuerte unión del agua con los sitios activos de sorción (Arslan, 2020; Yao *et al.*, 2020).

El primer término del modelo de **DAW** que relaciona los parámetros K y K' representan el número de sitios de adsorción con enlaces fuertes, es decir, la máxima adsorción en sitios primarios (Socorro *et al.*, 2010). Los valores obtenidos indicaron que las semillas evaluadas contienen pocos puntos de adsorción con enlaces relativamente fuertes; resultado que confirmó lo obtenido para el coeficiente **B** de la ecuación de Halsey, **A** y **C** del modelo de **Peleg**.

La cinética de sorción obtenida permitió establecer el rango de contenido de humedad que deben presentar estas semillas para poder almacenarse y obtener una máxima durabilidad. Además de aportar elementos importantes para conocer la dinámica de sorción estos granos, que sirvan de base para la mejora continua de la calidad durante el manejo postcosecha de cada uno.

CONCLUSIONES

Los modelos de Peleg, Halsey, BET, DAW y Adam y Shove caracterizan el proceso de adsorción y establecen el rango de contenido de humedad que deben presentar las variedades CUFIG 48, La Cuba 154, CUFIG 110, CUL 156, CUFIG 145, Engañador y Quivicán para poder almacenarse y obtener una máxima durabilidad a temperatura ambiente.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias bibliográficas

- Alpizar, E.; Castaño, J.; Carrillo, H.; Alvarez, J.; Gallardo, R.; Pérez, C. y Guadarrama, A. (2018): "Thermodynamic sorption analysis and glass transition temperature of faba bean (*vicia faba* L.) Protein". *J. Food sci. Technol.* 55: 935–943. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-3001-1>.
- AOAC. (1990). Association of Official Analytical Chemists. Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. [acceso: 20/05/2021]. <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/aoac.methods.1.1990.pdf>.
- Arslan, S. (2020). Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 57(3): 543–550. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02978-8>.
- Brunauer, S., Deming, S. L., Deming, E. W. y Teller, E. (1940). On a Theory of the Van der Waals Adsorption of Gases. *J. Am. Chem. Soc.* <https://doi.org/10.1021/ja01864a025>.
- Cárdenas, E. L. y Ramírez, D. K. (2021). Determinación de isothermas de adsorción en aguaymanto deshidratado a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos. Tesis de Diploma. Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos. 74 p. <http://repositorio.unica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13028/3877/>.
- Castro, E. I. (2022): Determinación experimental de isothermas de sorción de humedad de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.). Tesis de Diploma. Universidad Técnica de Ambato. 71 p. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/808>.
- Guilherme, G. L. and Nicolin, D. J. (2020). Soybean drying as a moving boundary problem: Shrinkage and moisture kinetics prediction, *J. Food Process. Eng.* e13497: 1-9. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13497>.
- He, Z., Zhang, D. y Cheng, H. N. (2021). Modeling and thermodynamic analysis of the water sorption isotherms of cotton seed products. *Foundations*.1:32-44. <https://doi.org/10.3390/foundations1010005>.
- Hernández, J. E.; Gutiérrez, J. D.; Gil, V. D. y Morales, W. (2021). Cultivares de frijol común CubaNa 23 y Odile: Propiedades físicas y comportamiento higroscópico de las semillas. III Convención Científica Internacional de Ciencia, Tecnología y Sociedad UCLV 2021. 37 pp. <https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Hernandez-Ruiz2/publication/356264039>.
- Kangue, A. F. y Boicet, T. (2020). Evaluación de los parámetros fisiológicos y físicos de semillas de cuatro variedades locales de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista digital de Medio Ambiente "Ojeando la agenda"*. 64: 33-51 p. ISSN 1989-6794.
- Morales, W.; Hernández, J. E. y Martínez, B. S. (2019), Modelos Físicos-Matemáticos de Difusión de agua en granos, II Convención Científica Internacional UCLV 2019, 23-30 junio 2019, Villa Clara. Cuba. https://www.researchgate.net/publication/337086003_Modelos_Fisicos-Matematicos_de_difusion_de_agua_en_granos.
- Noguera, D. F. y Rivero, D. M. (2021). Isothermas dinámicas de sorción de humedad y propiedades termodinámicas de café soluble. *Revista Ingeniería y Región*. 25: 32-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8159802>.
- Socorro, A., Vega, M. y Calderón, S. (2010). Seed equilibrium moisture curves, water binding and its relationship with thermodynamic magnitudes. *International Agrophysics*. 24(3): 313-320 pp. ISSN: 0236-8722. <http://www.old.international-agrophysics.org/en/issues>.
- Yao, K.; Anthony, J.; Maghirang, R.; Hagstrum, D.; Zhu, K. and Bhadriraju, S. (2020). Using dynamic dewpoint isotherms to determine the optimal storage conditions of inert dust-treated hard red winter

wheat. Grain and Oil Science and Technology. 3(4): 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2020.06.004>.

Información adicional

redalyc-journal-id: 813



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81377384009>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Yaisely Orquídea Hernández Fernández,
Randers José Socorro Toledo, Michely Vega León,
Eliezer Ferrer Tamayo, Rayniel Cabrales Nohay,
Leonor Pérez Rodríguez

**Caracterización del proceso de sorción de humedad en
semillas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) a través
de modelos matemáticos**

**Characterization of the moisture sorption process in
common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds through
mathematical models**

Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha
vol. 24, núm. 2, p. 197 - 214, 2023
Asociación Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, S.C.,
México
rebasa@hmo.megared.net.mx

ISSN: 1665-0204