

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO EN SEMILLAS DE HORTALIZAS

Alfredo Socorro

*Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt" INIFAT Calle 2 esq. 1 Santiago de Las Vegas Boyeros CP 17200
Teléfono: 6830093 FAX: 537-6839014 email: asocorro@inifat.co.cu*

RESUMEN

En este trabajo se comparan los modelos de humedad de equilibrio de semillas: D'Arcy-Watt (DAW), Chung-Pfost (CHP) y Socorro (SOC) utilizando semillas de acelga (*Beta vulgaris* L. cv: PK-7); berenjena (*Solanum melongena* L. cv: FHB-1); berza (*Brassica oleracea* L. cv: Georgia L-9); lechuga (*Lactuca sativa* L. cv: GR-30); pimiento (*Capsicum annum* L. cv: Chay L-3) y zanahoria (*Daucus carota* L. cv: P-29). Se utilizaron además datos de soya (*Glycine Max* L.) a dos valores de temperatura (20 y 30 grados Celsius), ajustados mediante el modelo de Henderson-Thompson (HTH). Se procedió a unificar matemáticamente los modelos de Oswin Modificado y el de Socorro (OSW-SOC), para obtener una nueva ecuación que posea la temperatura de forma explícita. A esta ecuación se le realizó un análisis comparativo de regresión respecto a los coeficientes de D'Arcy-Watt obtenidos para cotiledones de caupí (*Vigna sinensis* Enal) arveja (*Vicia faba* L.) y maní (*Arachis hypogaea* L.). Se obtuvo que los modelos DAW, CHP y SOC se ajustan a las especies utilizadas con altos coeficientes de bondad de ajuste, así como el modelo de HTH resulta apropiado para granos de soya. Esto nos permite poder seleccionar determinados modelos para cada especie, con el fin de elaborar herramientas informáticas que contribuyan a manejar estas variables durante el proceso de conservación. La nueva ecuación obtenida (OSW-SOC), se ajustó con relación a DAW en un alto porcentaje, en los respectivos cotiledones de las tres especies utilizadas.

Palabras clave: Equilibrio, humedad, isoterma, modelo, semilla.

MATHEMATICAL MODELATION OF HYGROSCOPIC EQUILIBRIUM PROCESS ON HORTICULTURE SEEDS

ABSTRACT

Different models of equilibrium moisture content of seeds: D'Arcy-Watt (DAW), Chung-Pfost (CHP) and Socorro (SOC) were compared in this paper. The cultivars used were beet (*Beta vulgaris* L. cv: PK-7); eggplant (*Solanum melongena* L. cv: FHB-1); cabbage (*Brassica oleracea* L. cv: Georgia L-9); lettuce (*Lactuca sativa* L. cv: GR-30); pepper (*Capsicum annum* L. cv: Chay L-3) y carrot (*Daucus carota* L. cv: P-29). Soybean seed moisture content values (*Glycine Max* L.) at 20 and 30 °C were used from references for fitting with Henderson-Thompson model. The equations of Oswin-Modified and Socorro were mathematically unified to obtain a new equation (OSW-SOC) with the temperature dependence directly. The OSW-SOC equation was compared with a regression comparative analysis, with respect to D'Arcy-Watt coefficients, using cotyledons of cowpea (*Vigna sinensis* Enal), faba bean (*Vicia faba* L.) and peanut (*Arachis hypogaea* L.). The fit by DAW, CHP and SOC model with high adjustment coefficients was obtained, as well as HTH model was appropriate for soybean grains. This allows us a model adequate selection for each species in the elaboration of informatic tools to manage these variables during the storage process. The new equation (OSW-SOC) obtained, was fitted regarding DAW with a high percentage on the respective cotyledons of the three species used.

Key words: Equilibrium, isotherm, model, moisture, seed.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de modelos matemáticos en la Agricultura ha constituido una herramienta para predecir determinados procesos investigativos o productivos (Welch *et al*, 2002). Para ello se han utilizado los resultados experimentales obtenidos en condiciones similares o la creación de nuevos software adecuados a cada uno de los procesos relacionados con la producción agrícola (Maros and Khaliq 2002). En el caso del manejo de semillas almacenadas, los modelos generalmente se construyen a partir de las propiedades de las magnitudes termodinámicas que conforman el sistema semilla-ambiente (Liang y Sun, 2002; Socorro *et al*, 2007).

La posibilidad de cuantificar los procesos que inciden en la calidad de las semillas, garantiza el valor agregado del material biológico durante el mayor tiempo posible. En dependencia del tiempo y de las características propias de cada especie (Clerkx *et al*, 2003), las semillas almacenadas pierden inevitablemente su poder germinativo en el tiempo. Por tal razón, muchas investigaciones han sido encaminadas hacia la búsqueda de parámetros o modelos que resultan óptimas para su conservación (Tang *et al*, 2000; Hay *et al*, 2003), como la humedad de equilibrio, temperatura, tipo de envase, etc.

El empleo de programas informáticos que faciliten el manejo de las semillas dentro de las cámaras de almacenamiento, con relación a los parámetros físicos que intervienen en el proceso de guardado de estos materiales, representa una alternativa muy útil. Para ello, se deben considerar los modelos existentes y seleccionar aquel que se ajusta con mayor nivel de aproximación.

Este trabajo tiene como propósito revisar, analizar y modificar algunos de los modelos que se aplican en el equilibrio higroscópico en las semillas conservadas, y de esta forma ajustarlos a los datos experimentales obtenidos y procedentes de la bibliografía.

Revisión de los modelos Matemáticos

Las ecuaciones de Equilibrio higroscópico permiten establecer una relación matemática entre la humedad relativa del aire circundante dentro de la cámara de almacenamiento " h_R " y el contenido de humedad de equilibrio de las semillas " C^* ". Esta curva de calibración resulta de utilidad para conocer, a partir de las lecturas del higrómetro colocado dentro de la cámara, los valores de humedad de equilibrio de cada especie vegetal que se almacena.

Esta dependencia entre el contenido de humedad de equilibrio y la humedad relativa del aire exterior (también denominada tensión relativa de los vapores específicos), es una curva sigmoidea denominada isoterma de adsorción (Ellis y Hong, 2006, Socorro *et al*, 2007). El comportamiento de cada curva depende de la temperatura.

Para expresar de manera teórica la relación entre C^* y h_R , se han propuesto diversos modelos matemáticos. Entre estas ecuaciones tenemos la de D'Arcy Watt (Vertuchi y Leopold, 1987, Tiwari y Tripathi, 1998, Hay *et al*, 2003), aplicable a un gran número de especies; la ecuación de Henderson-Thompson propuesta en 1968, aplicable a procesos de adsorción y des-adsorción de granos (Ospina y Cruz, 1989, Marques y Manal, 1991, Jiménez *et al*, 1995, Eslava, 2000); la ecuación de Socorro (Socorro *et al*, 2007), aplicable a varios cultivares cubanos; así como las de Chung-Pfost desarrollada en 1976 (Eslava, 2000) y la de Oswin (modificada en 1946) (Resende *et al*, 2006). En la tabla 1 se muestran las expresiones correspondientes a estos cinco modelos.

Las magnitudes K , K' , c , k , k' , D_1 , D_2 , d , a , b , α , A , B , δ , C_{50} y λ , son coeficientes que se obtienen al ajustar las curvas experimentales y en todos los casos dependen de la especie vegetal y/o del tejido. En el caso de las ecuaciones (1) y (3), la temperatura no aparece explícitamente dentro de la ecuación, mientras que en (2), (4) y (5) aparece en unidades de grados Celsius. Todos los coeficientes son adimensionales excepto D_1 y b que poseen unidades de $(^\circ\text{C})^{-1}$ mientras que D_2 y δ están referidos en grados Celsius.

Una de las principales desventajas de los modelos que no poseen explícitamente una dependencia respecto a T , radica que se necesita de manera experimental obtener los

coeficientes para cada valor de temperatura, mientras que en el caso de los modelos T-dependientes (CHP, HTH y OSW), bastaría obtener sus parámetros propios para cada especie y/o variedad y de esta forma se garantizan las curvas para todo un rango de temperatura que va desde 1-5 grados hasta 35-50 grados Celsius.

Tabla 1. Ecuaciones de equilibrio higroscópico.

Modelo	Ecuación	
D'Arcy-Watt (DAW)	$C^* = \frac{KK'h_R}{1 + Kh_R} + ch_R + \frac{kk'h_R}{1 - kh_R}$	(1)
Chung-Pfost (CHP)	$C^* = A - B \ln[-(T + \delta) \ln(h_R)]$	(2)
Socorro et al (SOC)	$C^* = C_{50} - \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{1}{h_R} - 1 \right]$	(3)
Oswin Modificada (OSW)	$C^* = \frac{(a + bT)}{\left[\frac{1}{h_R} - 1 \right]^{1/\alpha}}$	(4)
Henderson-Thomson (HTH)	$C^* = \left[\frac{\ln(1 - h_R)}{-D_1(T + D_2)} \right]^{1/d}$	(5)

MATERIALES y MÉTODOS

1 Unificación de los modelos OSW y SOC.

Para obtener una nueva expresión que posea un alto porcentaje de ajuste, sea sencilla y contenga a la temperatura de forma explícita, se realizó una unificación de las ecuaciones de Oswin (OSW) (ecuación 3) y Socorro (SOC) (ecuación 4). Al aplicar la siguiente transformación de variables:

$$X = \frac{1}{h_R} - 1 \quad (6)$$

$$\text{(Oswin)} \quad C^* = \frac{(a + bT)}{X^{1/\alpha}} \quad (7)$$

$$\text{(Socorro)} \quad C^* = C_{50} - \frac{1}{\lambda} \ln X \quad (8)$$

Se obtiene que en una vecindad del punto medio ($h_R=0.5$; $X=1$), se cumple:

$$C_{50} \approx a + bT \quad (9)$$

Que corresponde al valor de la humedad de equilibrio cuando las semillas se han colocado en una atmósfera de un 50% de humedad relativa. De este modo la expresión (5) queda transformada en una nueva ecuación (OSW-SOC):

$$C^* = W_1 + W_2 T' - \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{1}{h_R} - 1 \right] \quad (10)$$

Aquí la temperatura se expresa en Kelvin, haciendo el cambio $T'=T+273.15$.

2 Obtención y procesamiento de los datos.

Se utilizaron los modelos DAW, CHP y SOC para ajustar los valores de humedad de equilibrio de semillas respecto a la humedad relativa del aire circundante, obtenidos mediante el empleo de soluciones salinas saturadas dentro de desecadoras (Fischler, 1993). Los valores de contenido de humedad se obtuvieron a partir del método de base seca (Ellis *et al*, 1985), para estandarizar a todos los modelos. Los datos corresponden a seis especies: acelga *Beta vulgaris* L. cv: PK-7; berenjena *Solanum melongena* L. cv: FHB-1; berza *Brassica oleracea* L. cv: Georgia L-9; lechuga *Lactuca sativa* L. cv: GR-30; pimiento *Capsicum annum* L. cv: Chay L-3; zanahoria *Daucus carota* L. cv: P-29. Los valores de humedad relativa de 0, 13, 33, 54, 64, 77, 87 y 100% se obtuvieron a una temperatura de 300 K.

Además se utilizaron datos de soya (*Glycine max* L.) a 20 y 30 °C (Ramirez, 2005), donde se incluyó el modelo de HTH. El ajuste de estas curvas a los datos experimentales y/o de la bibliografía, se realizó mediante el método de los mínimos cuadrados. El porcentaje de bondad de ajuste "PBA", se calculó a partir del coeficiente de determinación del ajuste (grado de bondad de ajuste) (Yamane, 1970), de modo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$PBA = 100\% \left(1 - \frac{S_E^2}{S_R^2} \right) \quad (11)$$

Donde S_E^2 es la varianza de los valores de las diferencias entre la curva y el valor de referencia, mientras que S_R^2 es la varianza de los datos de referencia. Estos valores de referencia pueden ser los datos experimentales o correspondientes a otra curva.

Para comprobar la ecuación (10) se utilizaron los datos de Vertucci y Leopold (1987) correspondientes a cotiledones de 3 especies vegetales: caupí (*Vigna sinensis* Enal) arveja (*Vicia faba* L.) y maní (*Arachis hypogaea* L.). A partir de los coeficientes de D'Arcy-Watt para cada valor de temperatura, se ajustaron los coeficientes W_1 , W_2 y λ para cada especie con su correspondiente valor de temperatura. Los coeficientes del modelo DAW se utilizaron como referencia, simulando los valores de humedad relativa desde 0 hasta 1 mediante intervalos de $\Delta h_R=0.01$ (1%).

Para la comparación de ambos modelos se utilizó el parámetro PBA (ecuación 11).

De este modo los coeficientes del modelo (OSW-SOC) se calcularon para cada cultivar, quedando la temperatura de forma explícita en la ecuación (10).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestran los datos de los coeficientes de 3 modelos, D'Arcy-Watt (DAW), Chung-Pfost (CHP) y Socorro (SOC), en seis especies vegetales. Los valores del porcentaje de ajuste muestra que el modelo DAW se aproxima con mayor precisión respecto a CHP y SOC. Las curvas correspondientes se muestran en la figura 1.

El comportamiento sigmoide de estas curvas, depende de cada especie. Existen referencias que vinculan los valores de los parámetros de las isotermas de adsorción con el contenido de grasa. De este modo se plantea que aquellas semillas con un mayor contenido de lípidos, alcanzan valores de contenido de humedad de equilibrio relativamente menores (Walters y Hill, 1998).

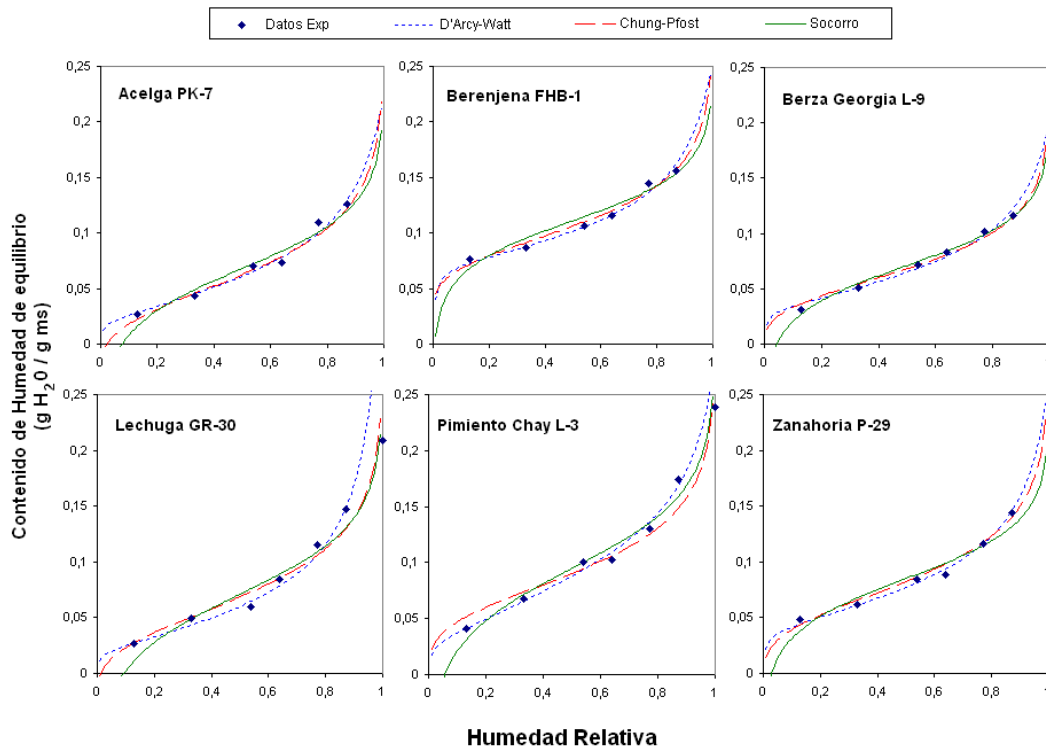


Figura 1. Curvas de contenido de humedad de equilibrio para semillas de las especies: acelga; berenjena; berza; lechuga; pimiento y zanahoria; respecto a la humedad relativa del aire. Los puntos muestran los datos experimentales (masa de agua sobre masa seca), mientras que las curvas corresponden a los modelos DAW, CHP y SOC, cuyos coeficientes se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes obtenidos para los modelos DAW, CHP y SOC en las especies acelga, berenjena, berza, lechuga, pimiento y zanahoria.

Modelo	Acelga	Berenjena	Berza	Lechuga	Pimiento	Zanahoria	
DAW	K	135	135	135	135	135	
	K'	0.020	0.069	0.019	0.019	0.037	0.028
	c	0.055	0.040	0.050	0.050	0.056	0.097
	k	0.90	0.90	0.95	0.95	0.92	0.92
	k'	0.017	0.017	0.018	0.018	0.015	0.014
PBA	99.6	99.8	99.9	99.4	99.6	99.9	
CHP	A	0.171	0.200	0.179	0.179	0.210	0.195
	B	0.037	0.032	0.038	0.038	0.036	0.036
	δ	2.08	2.01	1.38	1.38	25.00	1.39
PBA	99.5	99.8	99.8	98.2	97.8	99.7	
SOC	λ	36.71	44.14	31.95	31.95	40.89	29.79
	C ₅₀	0.068	0.111	0.071	0.071	0.085	0.095
	PBA	99.2	99.5	99.9	97.5	98.8	99.3

Uno de los modelos que efectúa un alto ajuste para semillas de soja es el de Henderson-Thomson (Tabla 3). De modo general, esta ecuación es válida para este tipo de grano (Vega, 2007). Sin embargo los coeficientes de este modelo, al igual que los del modelo CHP (Tabla 2)

no poseen una interpretación físico-matemática que permita realizar comparaciones entre especies utilizando estos coeficientes. Por ejemplo, en la tabla 2, los valores de δ , oscilan entre 1.38 y 2.08 °C para todas las especies excepto para el pimienta cuyo valor llega hasta los 25 °C. En el caso de los coeficientes de DAW, los parámetros K y K' están vinculados a los sitios de adsorción donde predominan enlaces fuertes entre las moléculas de agua dentro del sistema, c se asocia a los enlaces débiles, mientras que k y k' están relacionadas con los sitios con predominio de enlaces multi-moleculares.

Tabla 3. Ajuste de los modelos DAW, HTH, CHP y SOC para diferentes casos de curvas de humedad de equilibrio en soya (Datos de Ramirez et al, 2005).

Modelo		20 OC	30 OC
DAW	K	135.5	134.5
	K'	0.022	0.030
	c	0.15	0.120
	k	1.03	1.04
	k'	0.006	0.007
PBA		93.1	70.4
HTH	D1	0.48	0.48
	D2	123.9	95.8
	d	2.07	1.95
PBA		93.5	97.1
CHP	A	0.235	0.219
	B	0.046	0.039
	δ	2.70	3.37
PBA		93.4	92.1
SOC	λ	23.50	30.63
	C50	0.115	0.101
	PBA		94.5

Aunque el modelo DAW aporta determinadas consideraciones teóricas, su expresión matemática no contiene a la temperatura. Esta dificultad obliga a obtener los valores de K, K', c, k y k' para cada valor de temperatura que se utiliza. La ecuación (10), aunque obtenida por aproximación entre los modelos OSW y SOC, permite establecer coeficientes únicos para una especie, quedando la temperatura de forma explícita en la ecuación.

En la tabla 4 se muestran los valores de los coeficientes del modelo DAW para tres especies en diferentes valores de temperatura, junto con los coeficientes de la ecuación (10): W_1 , W_2 y λ , correspondientes a cada cultivo. En la figura 3 se representan las curvas teóricas de las isotermas de adsorción para las semillas de estos tres cultivares, utilizando 3 valores de temperatura.

El comportamiento de estas curvas concuerda con lo establecido desde el punto de vista teórico. A medida que aumenta la temperatura, el equilibrio entre el agua libre y el vapor de agua se establece a un mayor valor de T, por tanto hay una tendencia a que una mayor cantidad de masa de agua se convierta en vapor, dando como resultado una mayor pérdida de agua dentro de los tejidos de la semilla. Esta dependencia se cumple no solo para el caso de tejidos vivos, sino para otros sistemas de mayor valor agregado, como por ejemplo la harina de soya (Eslava, 1999). Ello demuestra la aplicabilidad no solo para la óptima conservación de semillas y granos destinados a la siembra y que por ende, necesitan conservar altos valores de viabilidad, sino también a aquellas dirigidas a la alimentación humana y animal.

Tabla 4. Valores de los coeficientes de la ecuación (10) modelos OSW-SOC, para cotiledones de diferentes especies a diferentes temperaturas. El modelo DAW expone los coeficientes para cada valor de temperatura y su ajuste al de OSW-SOC, el cual propone los coeficientes para cada especie dejando la temperatura de forma explícita en la ecuación (10).

Especie	T °C	K	K'	DAW			PBA	OSW-SOC		
				c	k	k'		W ₁	W ₂	λ
Caupí	5	76.8	0.088	0.097	1.02	0.011	99.9	0.285	-0.00052	3.91
	20	78.8	0.042	0.142	1.01	0.009	99.9			
	35	59.4	0.034	0.139	1.06	0.005	98.0			
Arveja	5	62.6	0.082	0.108	1.02	0.013	99.9	0.295	-0.00050	3.71
	20	53.9	0.054	0.130	1.03	0.009	93.0			
	35	17.9	0.05	0.115	1.05	0.009	99.7			
Maní	5	134.5	0.04	0.036	1.04	0.007	99.8	0.199	-0.00045	4.51
	20	114.1	0.029	0.057	1.06	0.004	97.9			
	35	135.9	0.014	0.077	1.08	0.002	71.3			

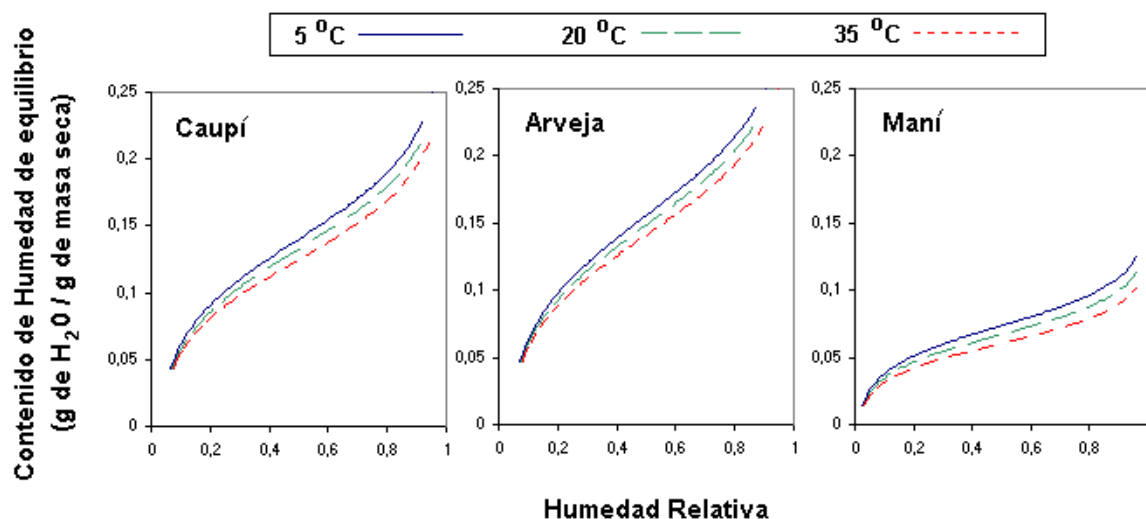


Figura 3. Curvas obtenidas por simulación utilizando la ecuación (10) utilizando los datos provenientes de Vertucci y Leopold (1987), para las tres especies: caupí, arveja y maní.

Aunque los modelos matemáticos en la agricultura, están tomando cierto auge, estos aún no se han generalizado completamente hacia el análisis de los parámetros de almacenamiento. Existen modelos no solo para describir el comportamiento de las curvas de equilibrio, sino también para relacionar los parámetros del almacenamiento con el grado de deterioro que sufren las semillas dentro de la cámara de almacenamiento. (Ellis y Hong, 2006). Pero para llegar a establecer una herramienta eficaz para estos propósitos, resulta necesario no solo estandarizar las metodologías, sino también integrar los diferentes modelos, aplicables en cada uno de los casos en que la bondad de ajuste de cada uno de ellos sea significativa. De este modo los productores y comercializadores de semillas pueden contar con una programas que les facilite el trabajo de guardado del material biológico en las cámaras de almacenamiento. Con la información experimental que se posea, es posible contar con bases de datos utilizable por el personal que está involucrado en la producción y comercialización de semillas, el cual pudiera escoger el modelo de curva de equilibrio que mejor se ajuste a determinado cultivar.

CONCLUSIONES

La integración de dos o más modelos para curvas de equilibrio higroscópico, pudiera desde el punto de vista práctico, constituir una herramienta para predecir los valores del contenido de humedad de las semillas en estado de conservación, con relación a la humedad relativa. Cada especie no se ajusta por igual a cada uno de los modelos expuestos. Aunque el modelo de D'Arcy-Watt posee una alta bondad de ajuste y sus coeficientes poseen una interpretación de tipo teórico, no posee una dependencia directa con la temperatura. Por ello, la aplicación de modelos como el de HTH y CHP pudiera ser más ventajosa en algunos casos.

Se obtuvo una ecuación para un nuevo modelo (OSW-SOC), dependiente de la temperatura, el cual resulta además muy cercano a la curva de DAW. Aunque este fue obtenido por aproximación, ofrece resultados tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

El manejo de las curvas de equilibrio mediante una expresión que contenga explícitamente a la temperatura, permite ajustar las condiciones óptimas de conservación de manera más efectiva en los bancos de germoplasma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Clerkx, E.J. M. , Blankestijn-De Vries, H., Ruys, G.J., Groot, S.P.C., and Koornneef, M. (2003). **Characterization of green seed, an Enhancer of *abi3-1* in Arabidopsis That Affects Seed Longevity.** *Plant Physiology*. 132(2) :1077-1084.
- Ellis, R.H. ; Hong, T.D. and Roberts, E.H. (1985). **Handbook of seed technology for genebanks. International Board for Plant Genetic Resources. 1-Principles and Methodology.** Rome. 667 pp.
- Ellis, R.H. and Hong, T.D. (2006) **Temperature Sensitivity of the Low-moisture –content Limit to Negative Seed Longevity-Moisture Content Relationships in Hermetic Storage.** *Annals of Botany* 97: 785-791.
- Eslava, A. (1999). **Manejo, almacenamiento, adecuación y conservación relacionado con la harina de soya americana.** *Revista Brasileña de Almacenamiento*. 24(1): 61-70.
- Eslava, A. (2000). **Hacia la unificación de un Modelo Matemático CHE/HRE de Isotermas de Equilibrio de adsorción para arroz Paddy.** *Revista Brasileña de Almacenamiento*. 25(1): 28-36.
- Fischler, M. (1993). **Bean germoplasm conservation based on seed drying with silicageland low moisture storage.** *Occasional Publications Series* (10). 31 pp.
- Hay, F.R., Mead, A., Manger, K. and Wilson, F.J. (2003) **One-step analysis of seed storage data and the longevity of Arabidopsis thaliana seeds.** *Journal of Experimental Botany*. 54(384): 993-1011.
- Jimenes, R., Zeledón, M. y Alizaga, R. (1995). **Relación de equilibrio entre el contenido de humedad de almendras de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) producidas en Costa Rica y la humedad relativa del aire.** *ASD Oil Palm Papers* 10: 16-26.
- Liang, Y. and Sun, W.Q. (2002). **Rate of Dehydration and Cumulative Desiccation Stress Interacted to Modulate Desiccation Tolerance of Recalcitrant Cocoa and Ginkgo Embryonic Tissues.** *Plant Physiology*. 128(3):1323-1331.
- Maros, I. and Khaliq, M.H. (2002). **Advances in design and implementation of optimization software.** *European Journal of Operational Research* 140: 322–337.
- Marques, J.A. y Manal, D. (1991). **Principio de secado de granos. Psicometría, higroscopia.** Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 68 pp.
- Ospina, J.E. y Cruz, N. (1989). **Simulación matemática del proceso de secado de granos.** *Revista Latinoamericana ACOGRANOS* 5(6): 14-22.
- Ramirez, D.P., Pereira, A. y Devilla, I.A. (2005). **Características de adsorción de agua de semillas de soya (*Glycine Max* L.) irradiadas con rayos-X.** *Revista Brasileña de Almacenamiento* 30(2): 198-208.

- Resende, O., Correa, P.C., Duarte, A.L. y Martins, R. (2006). **Isotermas de calor isotérmico de des-adsorción de arroz.** Revista Brasileña de Almacenamiento. 31(1) : 86-94.
- Socorro, A., Hernández, E., Calderón, S. y Penichet, H. (2007). **Modelo para curvas isotérmicas de humedad de equilibrio en semillas de interés agrícola.** Revista Cubana de Física 24(2): 138-143.
- Tang, S., TeKrony, D.M., Egli, D.B. and Cornelius, P.L. (2000). **An alternative Model to Predict Corn Seed Deterioration during Storage.** Crop Science 40: 463-470.
- Tiwari, B.S. and Tripathi, S.N. (1998). **Water Binding in sub-aerial Cyanobacteria.** Indian Journal of Biochemistry and Biophysics. 35(1): 52-61.
- Vega, M. (2007). **Bases Científicas para el establecimiento de Tecnologías a la Medida para la Cosecha y Beneficio de la semilla de Soya.** Tesis para optar por el Grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana, 130 pp.
- Vertucci, C.W. and Leopold, A.C. (1987). **Water Binding in Legume Seeds.** Plant Physiology 85(1): 224-231.
- Walters, W. and Hill, L.M. (1998). **Water sorption isotherms of seeds from ultra-dry experiments.** Seed Science Research 8(1): 69-73.
- Welch, S.M., Jones, J.W., Brennan, M.W., Reeder, G. and Jacobson, B.M. (2002). **PCYield: model-based decision support for soybean production.** Agricultural Systems 74: 79-98
- Yamane, T. (1970). **Statistics. An introductory Analysis.** Edición Revolucionaria. Instituto del Libro. 2nd Edition. La Habana. 919 pp.