

UN MODELO PROPUESTO PARA ISOTERMAS DE EQUILIBRIO¹

A proposed model for equilibrium isotherms

Ricardo Muñoz C.²

SUMMARY

A model was proposed to calculate the equilibrium moisture according to temperature and relative humidity. This model was compared with Henderson Modified and Chung - Pfof models, respectively. The experimental data of rough Oro rice to 10°, 25° and 40°C were used. The mean and maximum error, standard error and determination coefficient were determined. The proposed model was

$$H = 8.1091 \exp(-8.54237 \times 10^{-3} T) + [1.29699 \times 10^{-2} \exp(1.29484 \times 10^{-3} \times T)] \times HR$$

and it registered the highest precision for estimate the experimental values of equilibrium moisture used.

INTRODUCCION

Las isothermas de "sorci3n" o de equilibrio se definen como la representaci3n gr3fica de la relaci3n existente entre el contenido de humedad de un producto en equilibrio con la humedad relativa y temperatura del ambiente que lo rodea (Hall, 1980). Estas isothermas o curvas de equilibrio pueden obtenerse en "desorci3n" o adsorci3n, seg3n si el producto llega al equilibrio ganando o perdiendo humedad, respectivamente.

Se han propuesto numerosos modelos o ecuaciones, modificados o simplificados, para predecir isothermas de equilibrio higrosc3pico de productos biol3gicos (Brunauer, Emmett y Tetter, 1938; Henderson, 1952; Day y Nelson, 1965; Chung y Pfof, 1967; Halsey (1948) citado por Iglesias y Chirife, 1976; Escardino, Font y Monton, 1978; Rossi y Roa, 1980; De Souza, Couro y Fostes, 1982; Morales, Jim3nez y Arata, 1983). En general, el manejo de las ecuaciones es complejo, exigiendo la mayor3a de las veces la asistencia de un computador.

De los modelos citados en la literatura, los m3s comunes, por su generalidad y relativa precisi3n, son los modelos Henderson modificado y Chung -

Pfof. Estos han sido aprobados por la Sociedad Americana de Ingenieros Agr3colas (ASAE) para ma3z y arroz paddy, entre otros granos (Chung y Lee, 1985):

Henderson modificado:

$$H = 1/100 \times [\ln(1-HR)] / -A \times (T+B)]^{1/C} \quad (1)$$

Chung - Pfof:

$$H = A - B \times \ln[-(T+C) \times \ln(HR)] \quad (2)$$

donde:

- H = Humedad de grano en decimal, base materia seca
- HR = Humedad relativa en decimal
- T = Temperatura, °C
- A, B, C = Constantes, seg3n modelo y tipo de grano.

Los objetivos del presente trabajo fueron proponer un modelo de ajuste, que permita estimar la humedad de equilibrio en funci3n de la humedad relativa y temperatura; y comparar la precisi3n de este, con la estimada por los modelos Henderson modificado y Chung - Pfof, respectivamente.

MATERIALES Y METODOS

Los datos experimentales usados en el desarrollo del modelo fueron los determinados por Mu3oz y Rebufel (1991), para arroz paddy, variedad Oro, mediante el m3todo de soluciones salinas saturadas a temperaturas de 10°, 25° y 40°C y un

¹Recepci3n de originales: 19 de abril de 1990.

Trabajo presentado en el XLI Congreso Anual de la Sociedad Agr3n3mica de Chile (SACH), Santiago, Chile, 8 al 11 de octubre de 1990.

²Estaci3n Experimental La Pialina (INIA), Casilla 439, Correo 3, Santiago, Chile.

rango de 32,1 a 88,4% de humedad relativa. El desarrollo del modelo derivó de suponer una expresión general (3), que predijera la humedad de equilibrio en función de la temperatura y humedad relativa.

$$H = f_1(T) \times \exp(f_2(T) \times HR) \quad (3)$$

donde:

H = Humedad de equilibrio, % base materia seca

HR = Humedad relativa, %

f₁(T) y f₂(T) = f(temperatura)

El modelo propuesto consistió en considerar primero f₁(T) y f₂(T), como constantes k₁ y k₂ en (3), respectivamente, para cada nivel de temperatura. En consecuencia, por regresión exponencial se obtuvo los valores de k₁ y k₂, a temperaturas de 10°, 25° y 40°C, respectivamente. Luego, las constantes k₁ y k₂, se ajustaron mediante regresión exponencial simple con la temperatura, a través del uso de una calculadora. Finalmente, las expresiones resultantes para f₁(T) y f₂(T), fueron sustituidas en la ecuación (3).

Con los valores experimentales del estudio, se determinó el valor de las constantes del modelo Chung - Pfof, a través del procedimiento computacional de regresión no lineal (NLIN) del sistema SAS (1988). El modelo Henderson modificado (4), determinado con los datos de Muñoz y Rebufel (1991), derivó en la siguiente ecuación:

$$H = 1/100 [\ln(1-HR)] / -2,712 \times 10^{-5} \times (T + 40,32191)^{1/2,32574} \quad (4)$$

Posteriormente se comparó la humedad de equilibrio experimental con las estimadas por el modelo propuesto, Henderson modificado y Chung - Pfof, respectivamente. Esta comparación se basó en el cálculo de error máximo y medio relativo, de acuerdo al criterio empleado por Rossi y otros (1981), cuya expresión es la siguiente:

$$E = |H_e - H_m| / H_e \times 100 \quad (5)$$

donde:

E = Error absoluto medio o máximo, %

H_e = Humedad de equilibrio experimental, % base materia seca

H_m = Humedad de equilibrio, según modelo, % base materia seca

También, se determinó el coeficiente de determinación (r²) y el error estándar de la estimación, según Little y Hills (1976).

RESULTADOS Y DISCUSION

El Cuadro 1 presenta los valores de las constantes k₁, k₂ y coeficientes de determinación de las regresiones de la humedad de equilibrio, en función de la humedad relativa determinadas para cada nivel de temperatura. Las expresiones calculadas para f₁(T) y f₂(T) son las siguientes:

$$f_1(T) = 8,10910 \times \exp(-8,54237 \times 10^{-3} \times T) \quad (6)$$

$$f_2(T) = 1,29699 \times 10^{-2} \times \exp(1,29484 \times 10^{-3} \times T) \quad (7)$$

Sustituyendo (6) y (7) en (3) se obtiene el modelo propuesto:

$$H = 8,1091 \exp(-8,54237 \times 10^{-3} T) + [1,29699 \times 10^{-2} \exp(1,29484 \times 10^{-3} \times T)] \times HR \quad (8)$$

La Figura 1 muestra los valores experimentales y las isotermas de equilibrio estimada por el modelo de ajuste propuesto (8).

CUADRO 1. Constantes de la regresión exponencial de la humedad de equilibrio de arroz paddy, variedad Oro, en función de la humedad relativa, a temperaturas de 10°, 25° y 40°C

TABLE 1 . Exponential regression constants to the equilibrium moisture of rough rice variety Oro as function to the relative humidity to 10°, 25° y 40°C temperatures

Temperaturas °C	Constantes		Coeficiente de determinación r ²
	k ₁	k ₂	
10	7,48066	1,31059 x 10 ⁻²	0,992
25	6,48774	1,34643 x 10 ⁻²	0,992
40	5,78952	1,36250 x 10 ⁻²	0,997

Aunque las ecuaciones Henderson modificado (4) y Chung - Pfof (9) estimaron satisfactoriamente los puntos experimentales, la ecuación propuesta (8) los estimó con un mayor ajuste. Esto se observa en las figuras 2, 3 y 4 y, cuantitativamente, en los errores relativos máximos y medios, coeficientes de determinación y error estándar, mostrados en el Cuadro 2.

$$H = 0,31407 - 0,052492 \times \ln[-(T + 25,33689) \times \ln(HR)] \quad (9)$$

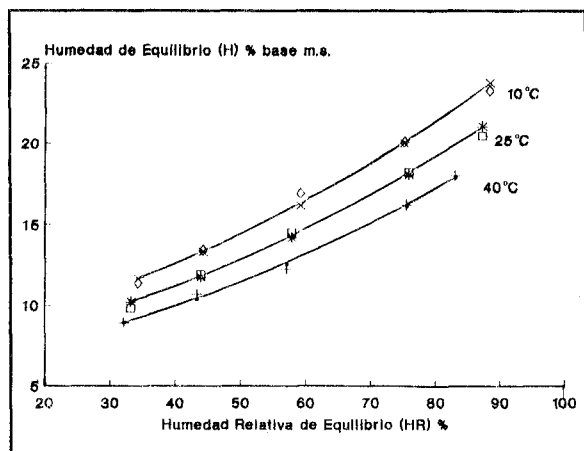


FIGURA 1. Isothermas de equilibrio de desorción para arroz paddy, variedad Oro, a temperaturas de 10°, 25° y 40°C, estimadas según modelo propuesto.

FIGURE 1. Desorption equilibrium Isotherms for rough paddy variety Oro to 10°C, 25° and 40°C temperatures, estimated by the proposed model.

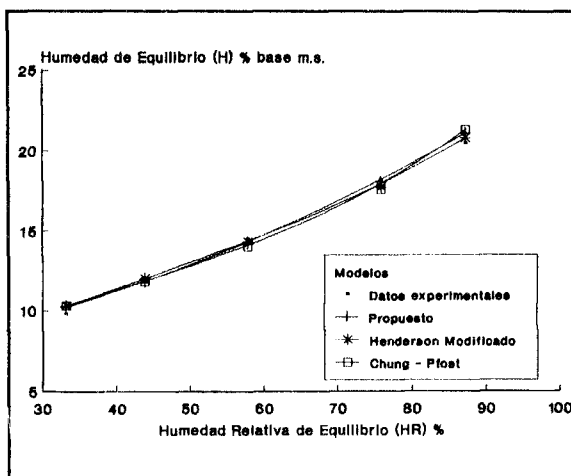


FIGURA 3. Isothermas de equilibrio de desorción para arroz paddy, variedad Oro, a 25°C.

FIGURE 3. Desorption equilibrium isotherm for rough rice variety Oro to 25°C.

CUADRO 2. Error medio, máximo y estándar y coeficiente de determinación del modelo propuesto y de los modelos Henderson modificado y Chung - Pfost para los datos experimentales de arroz paddy, variedad Oro

TABLE 2. Mean, maximum and standar error and determination coefficient for the proposed model and the Henderson Modified and Chung - Pfost models from experimentals values of rough rice variety Oro

Modelos	Error			Coef. de determinación r ²
	Medio %	Máximo %	Estándar	
Propuesto	1,79	4,31	0,1277	0,994
Henderson mod.	2,43	5,39	0,1705	0,992
Chung - Pfost	3,05	8,05	0,3222	0,984

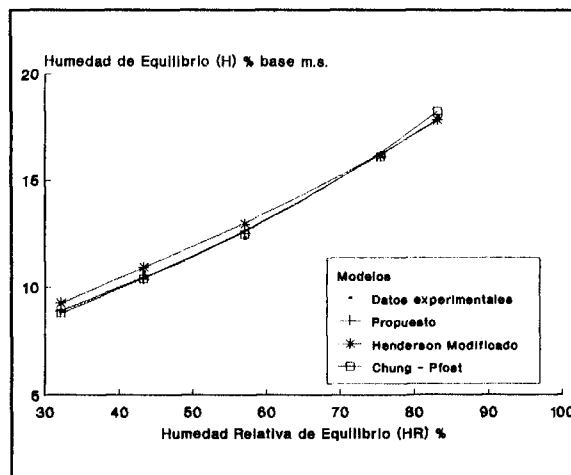


FIGURA 4. Isothermas de equilibrio de desorción para arroz paddy, variedad Oro, a 40°C.

FIGURE 4. Desorption equilibrium isotherm for rough rice variety Oro to 40°C.

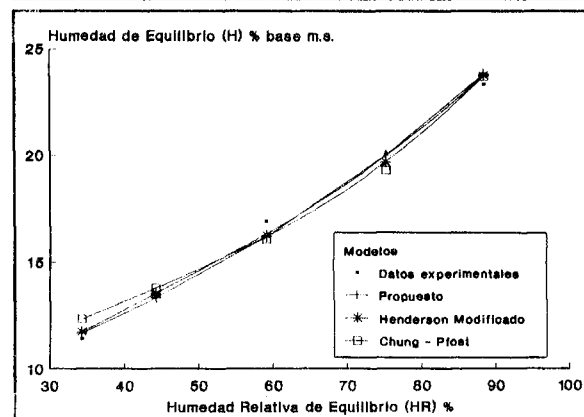


FIGURA 2. Isothermas de equilibrio de desorción para arroz paddy, variedad Oro, a 10°C.

FIGURE 2. Equilibrium isotherm for rough rice variety Oro to 10°C.

CONCLUSIONES

- Los valores experimentales de humedad de equilibrio en función de la temperatura y humedad relativa, se ajustaron en forma satisfactoria al modelo propuesto:

$$H = 8,1091 \exp(- 8,54237 \times 10^{-3} T) + [1,29699 \times 10^{-2} \exp(1,29484 \times 10^{-3} \times T)] \times HR$$

- El modelo propuesto estimó mejor la humedad de equilibrio experimental desde el punto de vista de la precisión cuantificada por el error relativo medio y máximo, error estándar y

coeficiente de determinación, cuando se comparó con la calculada por los modelos Henderson modificado y Chung - Pfof, respectivamente.

RESUMEN

Se propuso un modelo para estimar la humedad de equilibrio en función de la temperatura y la humedad relativa, y se confrontó con la precisión de los modelos Henderson Modificado y Chung - Pfof, respectivamente. Se utilizaron datos experimentales de humedad de equilibrio de arroz paddy, variedad Oro, a temperatura de 10°, 25° y 40°C. Para determinar el modelo con mejor precisión en estimar la humedad de equilibrio, se calcularon los errores relativos medios y máximos,

error estándar y coeficiente de determinación. El modelo de ajuste propuesto fue:

$$H = 8,1091 \exp(- 8,54237 \times 10^{-3} T) + [1,29699 \times 10^{-2} \exp(1,29484 \times 10^{-3} \times T)] \times HR$$

Este registró la mejor precisión para estimar los valores experimentales de humedad de equilibrio usados en el estudio.

LITERATURA CITADA

- BRUNAUER, S.P., EMMETT, H., and TELLER, E. 1938. Adsorption of gases in multi-molecular layers. *J. of Am. Chem. Soc.* 60: 309-319.
- CHUNG, D.S. and PFOF, H.B. 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain and their products. Part II: Development of the general isotherm equation. *Transaction of the ASAE* 10: 552-555.
- CHUNG, D.S. and LEE, CH. 1985. Physical and thermal properties of grains. In: Champ, B.R. and Highley, E. (ed.). *Preserving grain quality by aeration and in-store drying. Proceedings of an International Seminar held at Kuala Lumpur, Malaysia, 9 - 11 October 1985. ACIAR Proceeding* Nº 15: 53-66.
- DAY, D.L. and NELSON, G.L. 1965. Desorption isotherms for wheat. *Transactions of the ASAE* 8: 293-297.
- DE SOUZA D.G., COURO M.S. y FOSTES, M. 1982. Método simples para avaliação de equações de isothermas e entalpias de sorção e vaporização de água em materiais biológicos. *Revista Brasileira de Armazenamento* 7(2): 69-80.
- ESCARDINO, A., FONT, R. y MONTON, J. 1978. Deseccación de granos de leguminosas. I. Determinación de las humedades de equilibrio de granos de habas y guisantes. *Rev. Agroquím. Tecnol. Alim.* 18(4): 499-505.
- HALL, C.W. 1980. *Drying and storage of agricultural crops.* The Avi Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut. EUA. 381 p.
- HENDERSON, S.M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering* 33: 29-32.
- IGLESIAS, H.A. and CHIRIFE, J. 1976. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. *Journal of Food Technology* 11: 109-116.
- LITTLE, T.M. y HILLS, F.J. 1976. *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura.* Ed. Trillas. México.
- MORALES, P.G., JIMENEZ, S.G. y ARATA, N.A. 1983. Deshidratación de vegetales. I. Isothermas de sorción. *Revista de Alimentos* 8(4):5-8.
- MUÑOZ C., R. y REBUFEL A., P. 1991. Humedad de equilibrio de arroz paddy, variedad Oro, a temperaturas de 10°, 25° y 40°C. *Agricultura Técnica (Chile)* 51 (1): 83-86.
- ROSSI, S.J. y ROA, G. 1980. Secagem e armazenamento de produtos agropecuarios com uso de energia solar e ar natural. *Secretaria da Indústria, Ciência e Tecnologia, Academia de Ciencia do Estado de Sao Paulo. Publicacao ACIEP Nº 22.* 295 p.
- ROSSI, S.J., FIOREZE, R., DE SOUZA C., V.M. y RAMALHO DE FARIAS, H. 1981. Curvas de Teor de umidade de equilibrio e calor latente de vaporização para castanhas de caju e rasas de mandioca. *Revista Brasileira de Armazenamento* 6(2): 5-10.
- SAS-STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. 1988. *SAS/STAT User's Guide, Release 6.03. Edition.* Copyright by SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA. Chapter 23.