

## SECADO DE GRANOS CEREALES EN LECHO SURTIDOR CONVENCIONAL

Cesario Condorhuamán C., Javier Armijo C., Leoncio Reyna M., Fanny Blas R., Hugo Galarreta D.

Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

### RESUMEN

Se ha obtenido los coeficientes de transferencia de masa y calor a partir de datos experimentales durante el secado de cereales granulares tales como arroz, trigo, cebada y avena; en una columna convencional de lecho surtidor haciendo uso de una corriente de aire caliente. El rango del flujo másico del aire varía entre 5.2 y 40 kg/sm<sup>2</sup>. los coeficientes de transferencia de masa y calor estimados varían entre 0.331 y 0.789 Kg/(sm<sup>2</sup>atm) y 43.7 a 53.8 W/m<sup>2</sup>K

**Palabras clave:** Secado de granos cereales, lecho surtidor, columnas empacadas coeficientes de transferencia de masa y calor, lecho surtidor convencional

### ABSTRACT

It has been obtained the mass and heat transfer coefficients from experimental data of the granular-cereals drying such as rice, wheat, barley and oat in a conventional spouted bed column. The range of mass air flow varies from 5.2 and 40 kg/sm<sup>2</sup>. The mass transfer coefficients varies from 0.331 and 0.789 Kg/(sm<sup>2</sup>atm), and heat transfer coefficient varies from 43.7 and 53.8 W/m<sup>2</sup>K

**Keys words:** Drying of cereal grain, spouted bed, bed columns, mass heat transfer coefficients and conventional spouted bed.

### INTRODUCCIÓN

El secado implica la reducción del contenido de humedad de un sólido por evaporación a una corriente de aire caliente; es una operación unitaria que desempeña un papel importante en casi todo los procesos industriales, especialmente en la agroindustria y generalmente va asociado con el último paso del proceso. Las razones por las que se emplea el secado en los procesos industriales son: facilita la manipulación del producto en el tratamiento posterior, tales como: tamizado, separación electrostática, etc., que requiere sólidos secos para una eficiencia máxima; permite la utilización satisfactoria del producto final en el mercado; reduce los costos de transporte, sobre todo en embarques de lar-

gas distancias; elimina en gran parte los problemas de envase; incrementa la capacidad de otros equipos e instalaciones de almacenaje y conserva la calidad del producto durante su almacenamiento y transporte.

El lecho surtidor se obtiene introduciendo el fluido por un orificio como un chorro de gas en la parte inferior del lecho granular de partículas, así se produce partículas dispersas en el eje del secador que asciende y termina en el tope del lecho. Las partículas caen en las proximidades de la superficie interna o surtidor y forma una fase densa anular y que lentamente desciende hacia el fondo de la columna, donde vuelve a encontrar el canal surtidor y se repite el ciclo. La técnica de lecho en surtidor se aplica exitosamente en el se-

cado de trigo[16] y muestra ser adecuado para otras operaciones de contacto sólido-fluido. Los requisitos esenciales para una evaluación de esta técnica con respecto a cualquier aplicación posible incluyen un conocimiento de las características de flujo, velocidad de transferencia de calor y propiedades fisicoquímicas de la transferencia del sistema en surtidor[9] y sus aplicaciones industriales son incontables[15] (Grace Lim, 1987) [17].

Cuando se seca un sólido húmedo por medio de una corriente de aire a temperatura y humedad constantes por un periodo de tiempo, el contenido de humedad del sólido disminuye hasta la saturación o «humedad de equilibrio». En el proceso de secado ocurre bajo dos mecanismos simultáneas, esto es, la transferencia de masa (evaporación de agua desde los granos hacia la corriente del aire caliente) y la transferencia de calor (calentamiento de los granos desde la temperatura ambiental hasta unos 50 °C) manteniendo una diferencia de temperatura respecto del aire que se encuentra a unos 80 °C.

El objetivo del presente trabajo es obtener los coeficientes de transferencia de masa y calor a partir de datos experimentales en el proceso de secado de cereales tales como: trigo, cebada, avena y lenteja haciendo uso de una unidad de lecho en surtidor convencional.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El contacto sólido fluido mediante la técnica de lecho en surtidor ha sido extensamente descrito por Mathur y Gishler<sup>[5,6,7]</sup>.

Los coeficientes de transferencia de calor reportados al secar cereales en lecho surtidor se encuentran hasta 1580 W/m<sup>2</sup>°C [8] para lechos fluidizados; es común valores entre 210 y 630 W/m<sup>2</sup>°C. En estudios recientes Zahed y Epstein<sup>[22,23]</sup> quienes analizan las ecuaciones empíricas propuestas por Zurit y Singh [16] con relación a la difusividad de la humedad en función de la temperatura y el contenido de humedad de tres granos cereales, y encuentran que la ecuación propuesta predice la temperatura y el contenido de humedad del producto secado en secadores

continuos de lecho surtidor. Malek y Lu<sup>[12]</sup> proponen una expresión matemática para la difusión de la humedad durante el secado de granos cereales donde el proceso de secado es gobernado por la transferencia simultánea de masa y calor internos. Mounfiel, Halton y Simpson<sup>[4]</sup> reportan los resultados del secado del trigo Inglés en secadores convencionales, así la temperatura de la corriente del aire a la entrada de la columna variaba entre 71 y 116 °C para flujos del aire entre 0,075 y 0,1686 m<sup>3</sup>/min y por cada kilogramo de trigo, este efecto fue correlacionado contra las cualidades de molienda del grano y otras propiedades. La eficiencia del secado era alto al aumentar la temperatura y disminuye al aumentar el flujo del aire. Birchard<sup>[2]</sup> reporta un estudio del efecto de la temperatura del aire y el tiempo de secado en función de las cualidades de horneado de la harina de trigo, indicando que no existen daños en el grano ni en las cualidades organolépticas de la harina. Stansfield y Cook<sup>[1]</sup> concluyen en base a los resultados de sus datos experimentales en el secado de trigo, que los valores máximos de los parámetros de secado eran la temperatura del aire caliente permisible hasta 83°C, una velocidad de secado sin riesgo por un lapso de 10 minutos de exposición por cada 1 % de humedad eliminando entre 19 a 14 %, y con temperatura del grano a la salida del secador hasta 43.5 °C. Cashmore<sup>[3]</sup> indica que existe una temperatura crítica de la corriente de aire, y que es una función del contenido de la humedad del grano. Para evitar daños en el cereal no debe excederse de este valor crítico. Viswanathan et al<sup>[18-19]</sup> investigó la dinámica del secado en lechos surtidores discontinuos y continuos durante el periodo de puesta en marcha, presentando ecuaciones analíticas para estimar el tiempo requerido, contenido de humedad, y temperatura para alcanzar el estado estable. Zurit y Singh<sup>[16]</sup> en un intento de optimizar el rendimiento de los lechos surtidor y surtidor-fluidizado en el secado de granos. mejoraron los resultados de la ecuación propuesta por Becker e Isaacson<sup>[13]</sup> en el secado discontinuo del arroz áspero relacionando la humedad de equilibrio superficial a la humedad cambiante del aire en la salida del lecho, usan-

do en el calculo del calor de desorción mediante una ecuación semiteórica como una función de temperatura y el contenido de la humedad, en lugar de usar valores constantes promedios[24]. Passos et, al. [21] combina las ecuaciones de Becker-Sallan[11], Viswanathan[19] y otros reportados en literatura con datos experimentales para describir los parámetros aerodinámicos de secado. Los resultados se presenta en términos de la eficiencia, tamaño del secador, consumo de energía y requerimientos del aire.

### DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA ( $K_y$ ) Y COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ( $h_s$ )

El coeficiente de transferencia de masa se estima de la gráfica de datos experimentales del peso húmedo en función del tiempo de secado y mediante la ecuación

$$K_y a = \left[ \frac{dw}{dt} \right] \left[ \frac{1}{H_w - H_g} \right] \quad (1)$$

donde  $H_w$  y  $H_g$  son humedades absolutas de la corriente de aire húmedo en el interfase y corriente,  $K_y$  es el coeficiente de transferencia de masa. La diferencia de Humedad se estima por:

$$\left[ H_w - H_g \right] = \frac{C_s \left[ T_g - T_w \right]}{\lambda_w} \quad (2)$$

El calor específico  $C_s$  de la mezcla vapor-aire se calcula por la ecuación

$$C_s = 0.21 + 0.46 H_{abs} \quad (3)$$

donde: ( $H_w - H_g$ ) es la diferencia de humedades absolutas.  $T_g$ , es la temperatura del bulbo seco a la salida del lecho de granos.  $T_w$ , es la temperatura del bulbo húmedo a la salida del lecho surtidor;  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua.

$\frac{dw}{A dt}$  es la velocidad constante de secado por área de transferencia.

La velocidad de secado puede expresarse en términos del coeficiente de transferencia de calor en vez del coeficiente de transferencia de masa.

$$\lambda_w \frac{dw}{d\theta} = \lambda_w [K_y a] [H_w - H_g] = h_s a [T_g - T_w] \quad (4)$$

El coeficiente de transferencia de calor se estima de la forma usual del factor de  $J_n$  como sigue:

$$\left[ \frac{h_v}{C_p G_v} \right] (N_{Pr})^{\frac{1}{3}} = b \left[ \frac{D G_v}{\mu} \right]^n \quad (5)$$

Los resultados reportados en la literatura para secado con aire la ecuación (5) se simplifica:

$$h_v = 0.0128 G_v^{0.8} \quad (6)$$

donde  $h_v$  es el coeficiente de transferencia de calor en Btu/(hft<sup>2</sup> °F) y  $G_v$  es el flujo másico del aire en lb/(hft<sup>2</sup>).

En el presente trabajo se ha obtenido datos experimentales y de la curva de secado se obtienen la velocidad de secado para cereales granulares de arroz, trigo, cebada y avena. Así mismo, se estiman los coeficientes de transferencia de masa y calor.

### MATERIAL Y MÉTODO

El equipo es una unidad de lechos surtidor convencional que consta de dos columnas de acero inoxidable de 10.6 y 76.2 mm de diámetros internos, una altura de 0.80 m por 1.6 milímetros de espesor, con cono truncado de 60° grados de inclinación en la base de la columna. El orificio de entrada del aire tiene un diámetro de 12.7 mm. La corriente de aire se calienta hasta 90°C en un intercambiador de coraza y tubos haciendo uso de vapor producido por el caldero marca Clever brooks. La velocidad del aire se con un rotámetro cuya escala está calibrado un rango de flujo entre 6.63 a 67.96 m<sup>3</sup>/h a condiciones de presión y temperatura estándares. El contenido de humedad inicial deseado se obtiene rociando agua sobre el cereal y almacenado en un recipiente herméticamente cerrado a la tempe-

ratura ambiental por un lapso de 24 y 48 horas. Se encontró que el periodo acondicionamiento de 48 horas era suficiente para una absorción reproducible del contenido agua en los granos. Finalmente, Los cereales se alimentan al lecho surtidor mediante un tolva con la ayuda de un gusano sin fin impulsado por un moto reductor marca TOMAS THEIGZ de 0.65 Hp de potencia. La variación de la humedad de los granos se determina mediante un detector de humedad analógico modelo G-6C-565-E, con escala calibrado para cada cereal. Las temperaturas de entrada y salida de la corriente de aire se mide con termómetro digital sensibilidad de  $\pm 0.1$  °C.

### Análisis y discusión de resultados

El diagrama de flujo aproximado de la unidad experimental implementado se presenta en la figura 1. Las tablas 1 y 2 son propiedades fisicoquímicas de los granos cereales obtenidos usando métodos estándares, así el diámetro de los granos cereales se obtiene aplicando el concepto de radio hidráulico, las densidades se han obtenido haciendo uso el método de picnómetro convencional, la porosidad por el método de desplazamiento, la esfericidad se obtiene de gráficas publicada en la literatura[25], así mismo las propiedades del aire a las condiciones de trabajo y algunos parámetros de secado. Los rangos de los parámetros y variables de secado y datos del lechos de granos cereales se pre-

sentan en las tablas 3, Los datos experimentales del sacado de granos cereales se presenta en la tabla 4 y en la figura 2 se muestra las curvas de secado de los cereales estudiadas expresadas como porcentaje en peso en base húmeda en función del tiempo. Los punto de la curva de secado se han correlacionado a un polinomio de segundo grado usando el ajuste de mínimos cuadrados cuyos resultados son:

$$[w(\theta)]_{avena} = 0.0024\theta^2 - 0.3081\theta + 22.004$$

$$[w(\theta)]_{cebada} = 0.0024\theta^2 - 0.2761\theta + 18.40$$

$$[w(\theta)]_{arroz} = 0.0018\theta^2 - 0.15\theta + 15.12$$

$$[w(\theta)]_{trigo} = -0.00132\theta^3 + 0.0117\theta^2 - 0.336\theta + 15.043$$

donde  $\theta$  es el tiempo de secado, en todo los caso el coeficiente de correlación es mayor a 0.99. La tendencia de los punto experimentales en la figura 2 muestra que la velocidad de secado es constante para los cuatro cereales es la misma, mientras que la velocidad decreciente varía para cada cereal dependiendo del contenido de humedad inicial. El proceso de secado finaliza al alcanzar el valor crítico del contenido de humedad. Las temperaturas de entrada y salida de la corriente de aire se han medido con termómetros digitales de sensibilidad  $\pm 0,1$  °C tal como se muestran en las tablas 5,6,7,8 y 9, respectivamente.

**Tabla N.º 1:** Propiedades fisicoquímicas de cereales.

Granos	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>p</sub> (m)	$\varepsilon$	$\Psi$
Trigo	1316	0,0426	0,400	0,900
Cebada	1051	0,0459	0,444	0,800
Avena	1005	0,0361	0,333	0,870
Arroz	1427	0,0328	0,412	0,850
Café	1120	0,0154	0,660	0,990
Quinoa	1380	0,0202	0,324	0,880

**Tabla N.º 2.** Propiedades físicas del fluido y del equipo.

Propiedades físicas del fluido y del equipo	Valor
Diámetro interior de la columna (m)	0.0762
Diámetro del orificio (m)	0,0128
Altura del lecho (m)	0,800
Área de la columna (m <sup>2</sup> )	0,00809
Temperatura bulbo seco (°C)	23,5
Temperatura bulbo húmedo (°C)	21,0
Humedad absoluta (kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>aire seco</sub> )	0,015
Volumen húmedo (m <sup>3</sup> <sub>aire húmedo</sub> /kg <sub>aire seco</sub> )	0,860
Humedad relativa	0,750
Viscosidad del agua (kg/m.s)	9,25×10 <sup>-04</sup>
Viscosidad del aire (kg/m.s)	0,18×10 <sup>-04</sup>
Densidad del aire húmedo (condiciones estándares, kg/m <sup>3</sup> )	1.220

**Tabla N.º 3.** Algunos parámetros durante el proceso de secado de los cereales.

Parámetros	Trigo	Cebada	Avena	Arroz
Temperatura del aire a la entrada (°C)	100,1	99,7	99,9	96,1
Velocidad mínima del surtidor (m/s)	2,50	2,44	1,93	2,04
Espesor del lecho de granos (m)	0,80	0,80	0,80	0,80
Diámetro del orificio de entrada (mm)	12,7	12,7	12,7	12,7
Tiempo de secado(s)	2700	3300	3600	2700
Flujo Másico (kg/sm <sup>2</sup> )	5.24	5.12	4.04	4.30
Coefficiente de transferencia de masa (kg/sm <sup>2</sup> )	0.525	0.331	0.789	0.408
Coefficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)	53.8	52.8	43.7	45.8

**Tabla N.º 4.** Datos experimentales del secado de los cereales en el lecho surtidor .

Tiempo (min.)	Trigo		Cebada		Arroz		Avena					
	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Temperatura (°C)				
		salida	entrada	salida	entrada	salida	entrada	salida	entrada			
5	13.30	38.0	100.1	17.50	46.50	99.7	14.75	38.00	96.10	21.00	30.00	99.90
10	12.65	38.7	100.9	15.80	47.10	99.9	13.50	39.50	96.60	18.75	32.80	100.20
15	12.30	39.3	101.5	14.50	48.00	100.1	12.80	41.30	97.20	17.50	35.70	100.60
20	12.10	39.8	102.2	13.80	48.60	100.9	12.00	43.00	97.50	16.80	39.80	101.30
25	12.00	40.2	102.9	13.00	49.50	101.3	11.50	45.80	97.90	16.00	42.70	102.00
30	11.90	40.5	103.4	12.50	50.50	102.0	11.20	47.60	98.20	15.00	46.90	102.40
35	11.85	40.8	103.9	11.80	52.20	102.7	10.90	48.80	98.40	14.50	50.70	102.80
40	11.80	41.0	105.0	11.30	54.20	103.2	10.75	50.20	98.50	13.50	53.50	103.20
45	11.75	41.1	105.6	10.80	55.50	103.9	10.50	52.00	98.60	12.80	55.20	103.80
50				10.20	55.90	104.5				12.00	57.00	104.10
55				9.80	56.20	104.9				11.00	59.00	104.20
60										10.50	61.50	104.40

## CONCLUSIONES

1. Los coeficientes de transferencia de masa y calor son directamente proporcionales a la velocidad del aire que circula en el lecho.
2. La mayor parte del proceso de secado se lleva a cabo a velocidad constante, donde el tiempo crítico, para los cereales oscila entre 18 y 36 minutos.

## LITERATURA CITADA

- [1] Stansfield, E. y W.H. Cook, «The Drying of Wheat», National Council Report, Nro. 25(1932).
- [2] Birchard, F.J., Dominion Grain Research Laboratory, 7<sup>th</sup> Annual Report, p. 14-16, (1933).
- [3] Cashmore, W.H., Agriculture, 49, #3, 144, 1942
- [4] Mounfiel, J.D., P. Halton, A.G. Simpson, J. Soc. Chem. Ind., pp. 97-104, April (1944.).
- [5] Mathur, K.B., P.E. Gishler, «Wheat Drying Using The Spouted Bed Technique», National Research Council of Canada, Ottawa, October, 1953.
- [6] Mathur, F.B. y Gishler P.E., A.I. Ch. E. Journal, 1, 157 (1955)
- [7] Mathur K. B., y Gishler P. E., J. Appl. Chem. 5, 624 (1955)
- [8] Mickley, H. S. Y Fairbanks, D. F., «Mechanism of Heat Transfer to Fluidized Beds», A.I.Ch.E. Journal, 1, (3), 374(1955).
- [9] Klassen, J. y Gishler P.E, «Heat Transfer from Column Wall to Bed in Spouted, Fluidized Packed Systems», Can. J. Chem. Eng. 36 12 (1958)
- [10] Mathur, K.B., P.E. Gishler, «A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles», Can. AICh E. Journal, 1, 157-164, (1958).
- [11] Becker, H.A., and Sallans, H.R., «Drying wheat in a spouted bed», Chem. Eng. Sci., 13, 97-112(1960).
- [12] Malek, M. A. y Lu B.C., «Heat T ransfer in Spouted Beds», Can Journal Chem. Eng. 42, 14,(1964).
- [13] Becker, H.A., and Isaacson, R.H., «Wheat drying in well-stirred-batch and continuous-moving-bed dryers», Can. J. Chem. Eng., 48, 560-567(1970).
- [14] Mathur K. B.; Epstain, N. «Dynamics of Spouted Beds »,adv. Chem. Eng. 9, 111-192 (1974a).
- [15] Mathur K. B.; Epstain, N. «Spouted beds», Academic Press: New York, (1974b).
- [16] Zurit, C.A. y R. P. Singh, «Simulation of Rough rice Drying in Spouted Bed», Drying'82, A.S. Mujumdar (ed) Mc Graw-Hill/Hemisphere, New York, 239-247(1982).
- [17] Grace, J. R. Y Lim, C. J. «Permanent Jet Formation in Beds of Particulate Solids», Can. J. Chem. Eng., 65, 160 -162(1987).
- [18] Viswanathan, K., Lyall, M.S., Negi, K.S., y Raychaudhury, B.C., «Experimental and theoretical study of batch drying of wheat in spouted beds», Proc. 4<sup>th</sup> int. Drying Symp., vol. 2, R. Toei and A.S. Mujumdar(eds.) Kyoto, 552-557(1984).
- [19] Viswanathan, K., Lyall, M.S. y Dhingra, S. C., «Dynamic model for batch drying of a well- stirred bed of solids», Drying'86 vol 1, A.S. Mujumdar(ed.), Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C., 135-141(1986).
- [20] Viswanathan, K., «Model for continuous drying of solids in fluidized/spouted beds», Can. J. Chem. Eng., 64, 87-95(1986)
- [21] Passos, M. L., Mujumdar, A. S. and Raghavan, V.G.S., «Spouted and spouted-fluidized beds for grain drying», Drying Tecchnology, 7, 663-696(1989).
- [22] Zahed, A.H., y N. Epstein, «Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains the thermal equilibrium Model», Can. J. Chem. Eng., 70, 945-956(1992)
- [23] Zahed, A.H., y N. Epstein, «On the diffusion Mechanism during Spouted Bed Drying of Cereal Grains», Drying Technology, 11, 401-409(1993).
- [24] Devahastin, S., A. S. Mujumdar, G. S. V. Raghavan, «Hydrodynamics Characteristics of a Rotating Jet Annular Spouted bed», Powder Technology, 103,169-174,(1999).
- [25] Brown, G., «Unit Operations», Ed. John Wiley & Sons, New York, 1951.

## NOMENCLATURA

$K_y$  Coeficiente de difusión de la película  
kg/(s m<sup>2</sup>. atm. diferencia humedad)

$H_g$  Humedad del aire kg agua/(kg aire seco)

$H_w$  Humedad del aire en la interfase aire agua, kg agua/(kg aire seco)

$I_w$  Calor latente de evaporación a la temperatura del bulbo húmedo.

$T_g - T_w$  Diferencia de temperatura entre bulbo seco y bulbo húmedo.

$A$  Área de transferencia de calor

$h_s$  Coeficiente promedio de transferencia de calor por convección.

$T_g$  Temperatura del aire

$T_s$  Temperatura promedio de la superficie de transferencia de calor .

## LEYENDA

**A:**compresor **B:**rotámetro  
**C:**caldera  
**D:**intercambiador de calor  
**E:**depósito de cereales  
**F:**tolva transportadora  
**G:**columna de calentamiento  
**H:**columna de enfriamiento

**1:**aire ambiental  
**2:**aire caliente  
**3:**aire frío  
**4:**vapor  
**5:**condensado  
**6,7,8:** cereales

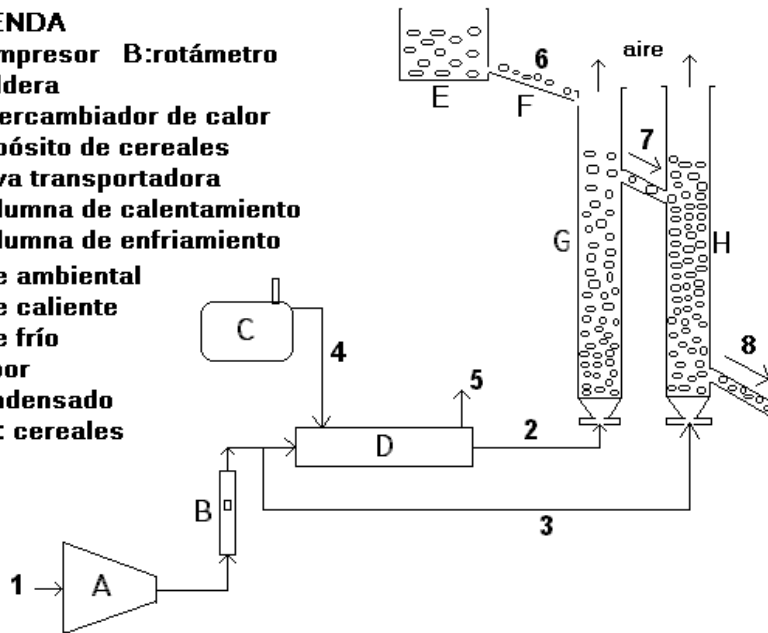


Figura N.º 1. Diagrama de flujo del equipo experimental.

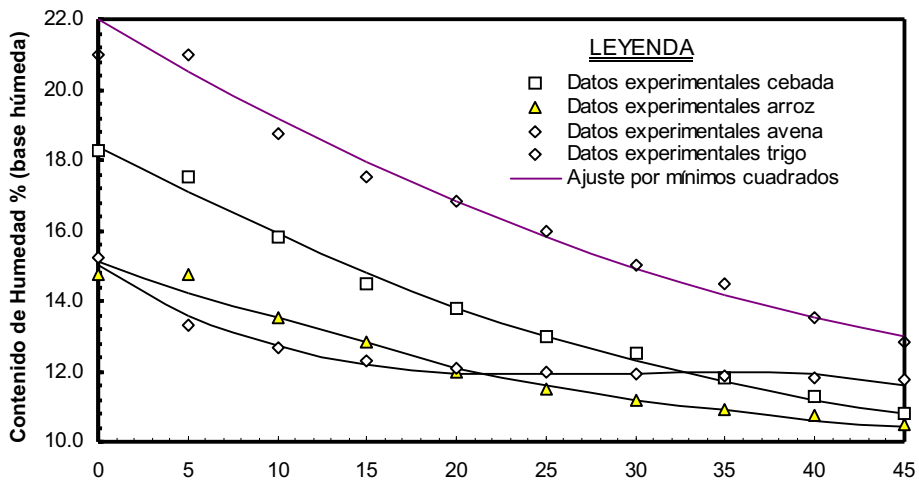


Figura N.º 2. Curva de secado de cereales y de correlación por mínimos cuadrados.