

## ENERGÍA

### ARTÍCULO ORIGINAL

# Influencia del flujo de aire extraído en la cinética de secado de la soya

## *Influence of airflow extracted in the kinetics of drying of soybean*

Ing. Gemma Dominguez Calvo, M.Sc. Yanoy Morejón Mesa, Ing. Osmel Fuentes Pérez

Universidad Agraria de la Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

**RESUMEN.** El presente trabajo se realizó en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, con el objetivo de determinar la influencia del flujo de aire extraído de una máquina de secado solar artesanal en la cinética de secado de granos de soya, para lo cual se plantearon las bases teórico-metodológicas y se establecieron cuatro flujos de aire para el desarrollo de la investigación con valores de 0,16; 0,20; 0,24 y 0,29 m<sup>3</sup>/s, entre los principales resultados se obtuvo que con flujos de aire de 0,24 y 0,29 m<sup>3</sup>/s se extraen 1,93 kW de energía por convección, lo que evidencia un aumento en la circulación del aire caliente por el interior de la capa de granos, siendo turbulento el régimen de movimiento del aire. Para un flujo de aire de 0,29 m<sup>3</sup>/s, se reduce la humedad inicial del grano desde 15,38% hasta 11,17 %, en un período de cuatro horas, removiéndose 4,3 kg de agua, con una tasa de reducción de humedad de 1,05% por hora. Además, esta variante tuvo un costo específico para secar una tonelada de soya de 83,3 peso/t, siendo inferior a los valores obtenidos en el resto de las variantes analizadas en la investigación, de esta forma se demuestra que el flujo de aire extraído influye directamente en la cinética de secado de granos de soya.

**Palabras clave:** flujo de aire, cinética de secado, secador solar artesanal.

**ABSTRACT.** This research was carried out on the National Institute of Agricultural Sciences, with the goal to determine the influence of the extracted airflow of a handcrafted solar dryer machine in the drying kinetic of soybeans. For that were set out the theoretical-methodological basis and four airflows settled down for the development of the research with airflows of 0.16; 0.20; 0.24 and 0.29 m<sup>3</sup>/s. Among the main results it was obtained that with airflows of 0.24 and 0.29 m<sup>3</sup>/s there are extracted 1.93 kW of energy by convection, evidencing an increase in the circulation of the hot air inside of the layer of grains, being turbulent the regime of movement of the air. For airflow of 0.29 m<sup>3</sup>/s decreases the initial moisture content of the grain from 15.38% until 11.17%, in a period of four hours, being removed 4.3 kg of water, with a rate of reduction of moisture content of 1.05 % per hour. This variant had a specific cost to dry a ton of soya of 83.3 peso/t, being less than the costs obtained in the rest of the variants analyzed in the research, being demonstrated that the extracted airflow have a direct influence in the drying kinetics.

**Keywords:** airflow, drying kinetic, artisan solar dryer.

## INTRODUCCIÓN

La producción de cereales constituyó una de las primeras actividades agrícolas, considerada como la base principal de las grandes civilizaciones siendo una fuente de alimentación constante. Los cereales son particularmente interesantes por su aporte energético, además de constituir fuentes de vitaminas y fibras dietéticas.

En el caso específico de la soya, constituye la legumbre seca de mayor valor energético por ser uno de los alimentos más completos y nutritivos. Su elevado contenido en proteínas es de alrededor del 40%, superior al de la carne, lo que hace

de la soya una fuente proteica vegetal de gran interés dietético y nutricional.

Los granos obtienen su máximo contenido de materia seca cuando llegan a su estado de madurez, por lo que es favorable cosecharlos en el momento adecuado para alcanzar la mayor productividad, evitando el ataque de depredadores y la contaminación del producto en el campo. En el proceso de producción de granos de soya el secado constituye la principal transformación del producto en la poscosecha y a

su vez es el procedimiento que más requiere atención para no afectar la calidad del mismo.

Para el desarrollo eficiente de este proceso se extrae el agua contenida en el producto, mediante un flujo de aire que puede suministrarse o extraerse hacia o desde la cámara de secado, de forma tal que cuando el grano es sometido al secado térmico simultáneamente existe una transferencia de energía y masa.

La elección de un flujo de aire adecuado tiene vital importancia para el éxito de los sistemas de secado. Si el flujo de aire es inferior al valor adecuado, se alarga el tiempo de secado y se puede comprometer la calidad del producto; si el flujo de aire es superior al valor adecuado, se disminuye el tiempo de secado, pero aumenta el consumo de energía para accionar el ventilador o extractor. El flujo mínimo de aire depende del tipo de producto, contenido inicial de humedad y las condiciones del clima de la región. La dependencia del tipo de grano está unida a la mayor susceptibilidad al deterioro que presentan algunos granos, en relación con otros, debido a su composición química y a la facilidad que tienen los hongos para penetrar en su interior.

Sobre la influencia del flujo de aire en el proceso de secado varias han sido las investigaciones que se han realizado en las que se han obtenido interesantes resultados, entre estas se pueden citar las realizadas por Thompson (1985); Petrushevichius y Steponaitis (1999); Novoshinskias y Zvicevichius (2000); Petrushevichius (2003); Krokida y Kouris (2003), Pupinis (2008).

Por otro lado Iguaz *et al.* (2003), establecieron modelos matemáticos que posibilitan a partir del flujo de aire a bajas temperaturas de secado, describir la tendencia de la difusividad y la humedad efectiva, en el caso específico del arroz rojo (Lido cultivar).

Los objetivos a lograr en el secado de los granos de soya, es reducir la humedad de los mismos a niveles normados, evitándose que se produzca descomposición durante el manejo poscosecha.

## MÉTODOS

### Bases teórico-metodológicas para la determinación del flujo de calor

Para la determinación del flujo de calor en función del flujo de aire extraído se emplea la ley que responde al fenómeno de transferencia de calor por convección térmica (Faires y Simmang, 1978; Zuritz *et al.*, 1990; Bird *et al.*, 1992; Geankoplis, 1998; Rosas, 2001; Welty-Chanes *et al.*, 2005).

### Bases teórico-metodológicas para la evaluación de la calidad del proceso de secado

Para separar el contenido de humedad de los granos es importante mantener circulando aire seco, siendo posible por la presencia de un extractor, por lo que es importante conocer el flujo de aire que circula entre los granos.

$$W_{\text{aire}} = S * A; \text{m}^3/\text{s} \quad (1)$$

donde:

S- velocidad media del viento, m/s;

A- área de la sección transversal del conducto, m<sup>2</sup>.

Es importante conocer que los productos con un alto contenido de humedad no se pueden almacenar por largos períodos de tiempo. El contenido de humedad es un índice de calidad del producto, este puede expresarse en base humedad o en base seca. También es posible determinar este parámetro utilizando un medidor de humedad (ASAE, 1991a; ASAE, 1991b).

$$M_{\text{wb}} = \frac{W}{W_a + W} * 100 \quad (2)$$

donde:

W- contenido de agua, kg;

Wa- masa después de secado el producto, kg.

El grado de humedad del grano es medido por períodos de una hora para observar el cambio en el contenido de humedad, esto se denomina tasa de reducción de humedad por hora, la cual se puede determinar por la expresión (3).

$$M_m = \frac{M_i - M_a}{t_o}, \% / h \quad (3)$$

donde:

Ma- contenido de humedad después del secado, %;

Mi- contenido inicial de humedad, %;

to- tiempo de operación, h.

La masa de soya después del secado se puede determinar utilizando una balanza ya que no es difícil retirar las semillas de la lámina de metal ponchada.

Antes de llevar a cabo el procedimiento para determinar la calidad del proceso de secado es imprescindible realizar el estudio de las condiciones climatológicas del área experimental (temperatura ambiente, humedad relativa, la velocidad del viento y las precipitaciones) ya que el proceso de secado con la utilización de secadores solares se puede afectar debido a estos parámetros.

Después de realizado el estudio y definido el lugar apropiado para realizar la evaluación del proceso de secado se deben realizar los siguientes pasos:

- Definir el grano a secar, así como su variedad;
- Determinar la humedad relativa, la temperatura ambiente;
- Determinar la masa inicial de grano a secar mediante una balanza analítica o digital;
- Determinar la humedad inicial de grano con la utilización del medidor de humedad para granos;
- Proceder a la toma de muestras del interior de la cámara de secado en períodos de una hora, en cinco puntos en la superficie y el fondo de la capa de granos, con el objetivo de determinarles el contenido de humedad utilizando el medidor de humedad;
- A los valores de contenido de humedad del grano obtenidos se les determina la media y es el valor que se coloca en una plantilla para el registro de los datos tomados;
- De igual forma en períodos de una hora se mide la velocidad del aire suministrado o extraído de la cámara de secado y

las temperaturas de la cámara de secado en la superficie y el fondo respectivamente con la utilización de un anemómetro y termómetros respectivamente.

### Bases para la evaluación económica del proceso de secado solar

Para la determinación del costo de explotación ( $C_{exp}$ ) del proceso de secado solar se requiere la determinación de los costos fijos ( $C_f$ ) y costos variables ( $C_v$ ) y la suma de estos costos permiten determinar el costo de explotación (Morejón *et al.*, 2011; Morejón *et al.*, 2014) es decir:

$$C_{exp} = \sum_{i=1}^n C_{fi} + \sum_{i=1}^n C_{vi}; \text{peso/h} \quad (4)$$

A partir del costo de explotación y la productividad del secador se determina el costo específico ( $C_{esp}$ ). El costo específico define el costo en peso por cada unidad de trabajo realizada, determinándose de la siguiente forma:

$$C_{esp} = \frac{C_{exp}}{W}; \text{peso/h} \quad (5)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Determinación del flujo de calor en función del flujo de aire extraído del secador solar

Para la determinación del flujo de calor en función del flujo de aire extraído, se consideró la ley de Newton- Richmann que responde a la forma de transferencia de calor por convección. A partir de estas se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 1.

**TABLA 1. Evaluación de la convección térmica en función del flujo de aire**

Flujo de aire	Q (Convección), kW
0,16 m <sup>3</sup> /s	1,92
0,20 m <sup>3</sup> /s	1,91
0,24 m <sup>3</sup> /s	1,93
0,29 m <sup>3</sup> /s	1,93

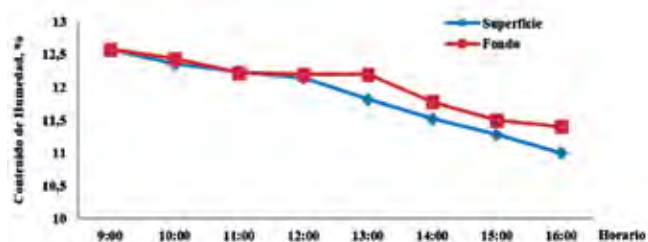
Analizándose el comportamiento del flujo de calor por convección en función del flujo de aire, se evidencia que para flujos de aire 0,24 y 0,29 m<sup>3</sup>/s se extraen 1,93 kW, lo que evidencia un aumento en la circulación del aire caliente por el interior de la capa de granos a secar, lo cual posibilita el incremento en la eficiencia del proceso de secado.

### Resultados de la evaluación de la calidad del proceso de secado

En el secador solar objeto de estudio el flujo de aire se dirige desde la cámara de secado hacia el extractor, atravesando una plancha metálica ponchada de 1,71 m<sup>2</sup> la cual cuenta con

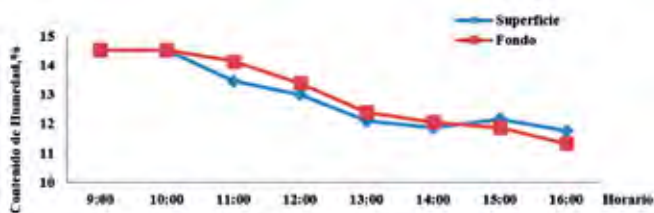
1 500 000 orificios de 1,2 mm de diámetro, obteniéndose un valor promedio de velocidad para cada variante de 2,37; 2,94; 3,56 y 4,28 m/s respectivamente y como el área del conducto por donde circula el mismo es de 0,07 m<sup>2</sup>, fue posible determinar el flujo de aire promedio por unidad de tiempo, siendo estos valores los representados en la Tabla 1.

Con el objetivo de analizar el proceso de secado de soja se determinó la cinética del mismo en la superficie y en el fondo de la capa de granos en función del flujo del aire extraído de la cámara de secado, como se muestra en las Figuras 1; 2; 3 y 4.



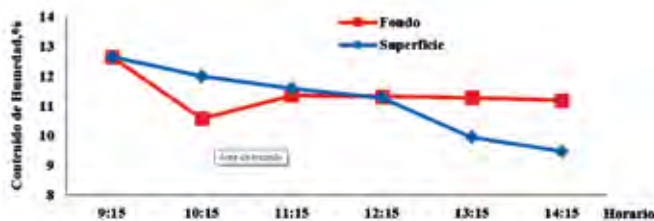
**FIGURA 1. Cinética de secado de soja con un flujo de aire de 0,16 m<sup>3</sup>/s.**

En el proceso de secado de soja con un flujo de aire de 0,16 m<sup>3</sup>/s en un período de siete horas, se redujo la humedad inicial del grano de 12,58% hasta 11,5%, siendo volteada la masa de granos con el objetivo de homogenizar el proceso de secado a las siete horas de haberse iniciado el experimento, removiéndose 3 kg de agua, con una tasa de reducción de humedad de 0,15%/h.



**FIGURA 2. Cinética de secado de soja con un flujo de aire de 0,20 m<sup>3</sup>/s.**

En la Figura 2 con un flujo de aire de 0,20 m<sup>3</sup>/s, en un período de siete horas, se redujo la humedad inicial del grano de 14,52% hasta 11,17%, sin necesidad de voltear la masa de grano durante el proceso dado que este se mantuvo de manera homogénea, removiéndose 3,72 kg de agua, con una tasa de reducción de humedad de 0,48%/h.



**FIGURA 3. Cinética de secado de soja con un flujo de aire de 0,24 m<sup>3</sup>/s.**

En la Figura 3 con un flujo de aire de 0,24 m<sup>3</sup>/s, en un período de cinco horas, se redujo la humedad inicial del grano de 12,66% hasta 10,34%, siendo volteada la masa de granos con el objetivo de homogenizar el proceso de secado a la primera hora de haberse iniciado el experimento,

removiéndose 2,1 kg de agua, con una tasa de reducción de humedad de 0,46%/h.

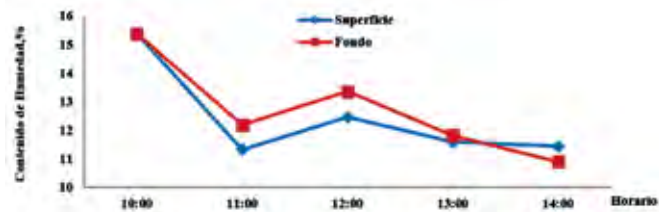


FIGURA 4. Cinética de secado de soja con un flujo de aire de 0,29 m³/s.

En la Figura 4 se observa que con un flujo de aire de 0,29 m³/s en un período de cuatro horas, se redujo la humedad inicial del grano de 15,38% hasta 11,17%, siendo volteada la masa de granos con el objetivo de homogenizar el proceso de secado a la primera hora de haberse iniciado el experimento, removiéndose 4,3 kg de agua, con una tasa de reducción de humedad de 1,05%/h; estos resultados demuestran que para mayor velocidad de extracción del flujo de aire, mayor será la eficiencia del proceso de secado.

Resultados de la evaluación económica del proceso de secado

El costo en salario, tiene como base al salario mínimo vigente en el país el cual es de 275 pesos y la cantidad de trabajo realizado en horas es de 192 h.

Los costos en combustibles y lubricantes son nulos dado que el secador objeto de estudio no requiere de combustible fósil, ni de lubricantes para su funcionamiento.

El costo por depreciación alcanza un valor de 0,039 peso/h, siendo el precio inicial del secador de 379 pesos, considerándose un porciento anual de depreciación del 15% y una carga anual de 180 días trabajando 8 horas.

El único dispositivo en el prototipo que requiere de mantenimiento es el acumulador y partiendo de la carga anual a la que se somete y del tiempo de duración de la carga para los diferentes experimentos; de las que se obtuvieron flujos de aire extraído de 0,16; 0,20; 0,24; 0,29 m³/s respectivamente, el tiempo de duración fue de 24; 19; 16 y 13 h de duración de la carga trabajando continuamente, de esta forma se obtuvo que la cantidad de mantenimientos en dependencia del flujo de aire extraído alcanzó valores de 61; 76; 91 y 111 respectivamente y como el precio de la electricidad requerida para el mantenimiento es 0,09 peso (0-100 kW·h) durante 8 h de mantenimiento, es posible obtener los costos de mantenimiento representados en la Tabla 2.

El costo en reparación no se considera pues los dispositivos con los que cuenta el secador no son reparables, ya que deben ser sustituidos una vez presenten una rotura.

También se determinó el costo específico o requerido para secar una tonelada de soja en función del flujo de aire extraído, observándose que la variante más eficiente fue la del flujo de

aire de 0,29 m³/s; con un valor de 83,3 peso/t.

TABLA 2. Evaluación económica del proceso de secado en función del flujo de aire extraído del secador

Costos	Proceso de secado
Costo en salario (Cs), peso/hora	1,43
Costo en combustibles (Cc), peso/hora	0
Costo por depreciación (Cd), peso/hora	0,039
Costo en mantenimiento (Cm), peso/hora	
Flujo de aire 0,16 m³/s	0,68
Flujo de aire 0,20 m³/s	0,85
Flujo de aire 0,24 m³/s	1,02
Flujo de aire 0,29 m³/s	1,24
Costo en aceites-lubricantes (Cl), peso/hora	0
Costos de explotación (Cexp), peso/hora	
Fujo de aire 0,16 m³/s	2,15
Flujo de aire 0,20 m³/s	2,32
Flujo de aire 0,24 m³/s	2,49
Flujo de aire 0,29 m³/s	2,71
Costo específico (Cesp), peso/t	
Flujo de aire 0,16 m³/s	165
Flujo de aire 0,20 m³/s	161
Flujo de aire 0,24 m³/s	95
Flujo de aire 0,29 m³/s	83,3

CONCLUSIONES

- Las bases teórico-metodológicas establecidas para la determinación de la influencia del flujo de aire en la cinética secado solar de granos, se validan dado que responden al objetivo general planteado en la investigación.
- En las variantes de flujos de aire de 0,24 y 0,29 m³/s se extraen 1,93 kW de energía por convección, lo que evidencia un aumento en la circulación del aire caliente por el interior de la capa de granos, siendo turbulento el régimen de movimiento del aire.
- En la variante de flujo de aire de 0,29 m³/s, se redujo la humedad inicial del grano desde 15,38% hasta 11,17%, en un período de cuatro horas, removiéndose 4,3 kg de agua, con una tasa de reducción de humedad de 1,05 %/h; siendo la variante de mayor eficiencia térmico-productiva.
- La variante de flujo de aire de 0,29 m³/s tuvo un costo específico para secar una tonelada de soja de 83,3 peso/t, siendo inferior a los valores obtenidos en el resto de las variantes analizadas en la investigación.
- Con esta investigación se demuestra que flujo de aire extraído influye directamente en la cinética de secado de granos de soja.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS–ASAE: ASAE Standard: S532.2: Moisture Measurement, 1991a.

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS–ASAE: ASAE Standard: D245.4: Moisture Relationship of Grains, 1991b.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N.: *Fenómenos de transporte*. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Wisconsin. Ediciones Repla. ISBN: 968-6165-02-9. México, 1987.
- FAIRES. V.M; SIMMANG, C.M.: *Thermodynamics*, 647pp., Editorial Macmillan, ISBN: 002-33-5530-1. USA, 1978.
- GEANKOPLIS, C.J.: *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Universidad de Minnesota. 3era Edición. Compañía Editorial Continental. ISBN: 968-26-1316-7, México, 1998.
- IGUAZ, A.; SAN MARTÍN, M.; MATÉ, J.; FERNÁNDEZ, T.; VÍRSEDA, P.: “Modelling effective moisture diffusivity of rouge rice (Lido cultivar) at low drying temperatures”, *Journal of Food Engineering*, ISSN: 0260-8774, 59: 253-258, 2003.
- KROKIDA, M.K. & KOURIS, M.D.: “Rehydration Kinetics of dehydration products”, *Journal of Food Engineering*. ISSN: 0260-8774. 2003.
- MOREJÓN MESA, Y., TSUJIMOTO, T., WATAHIKI, T.: “Fabrication and evaluation of a Solar Grain Dryer”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 20(3): 68-72, 2011.
- MOREJÓN MESA Y., RODRÍGUEZ GAGO Y.; LEÓN MARTÍNEZ, J.: “Use of an Artisan Solar Grain Dryer to dry soybeans and black beans seeds”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 23(4): 17-20, 2014.
- NOVOSHINSKAS, H.; ZVICEVICHUS, E.: “Grain drying in variable cross-section tank”, *Journal Agricultural Engineering Research*, ISSN: 2239-6268, 32(3): 61-68, 2000.
- PETRUSHEVICHUS, V.: “The comparative discharge of blowing through grain air while drying by active ventilation”, *Journal Agricultural Engineering Research*, ISSN: 2239-6268, 35(4): 22-29, 2003.
- PETRUSHEVICHUS, V.; STEPONAITIS, V.: “Requirement energy for grain drying by active ventilation”, *Journal Agricultural Engineering Research*, ISSN: 2239-6268, 31(2): 19-30, 1999.
- PUPINIS, G.: “Grain Drying by use of changeable air flow method”, *Institute of Agricultural Engineering, Agronomy Research*, ISSN: 1406-894X, 6(1): 55-65, 2008.
- ROSAS, M.: *Energía solar térmica*, 148pp., Primera Edición, Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, ISBN: 84-8301-4726, España, 2001.
- THOMPSON, J. F.: “Modified Air Flow Rate and Temperature Hop drying”, *American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASABE*, ISSN: 0001-2351, 28(4): 1297-1300, 1985.
- WELTI-CHANGES, J.; VELGARA-BALDERA, F., BERMÚDEZ-AGUIRRE, D.: “Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances”, *Journal of Food Engineering*, ISSN: 0260-8774, 67: 113-128, 2005.
- ZURITZ C.A., MCCOY, S.; SASTRY, S.K.: “Convection heat transfer coefficients for irregular particles immersed in non-Newtonian fluids during tube flow”, *Journal of Food Engineering*, ISSN: 0260-8774, 11: 159-174, 1990.

---

**Recibido:** 18/12/2014.

**Aprobado:** 14/11/2015.

**Publicado:** 05/12/2015.

Gemma Domínguez Calvo, Prof. Auxiliar, Universidad Agraria de la Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, CP: 32700. Correo electrónico: [gemma@unah.edu.cu](mailto:gemma@unah.edu.cu)

Yanoy Morejón Mesa, Correo electrónico: [ymm@unah.edu.cu](mailto:ymm@unah.edu.cu)

Osmel Fuentes Pérez, Correo electrónico: [ymm@unah.edu.cu](mailto:ymm@unah.edu.cu)