

SIMULACION DE SECADO DE CAFE EN CAPA FIJA CON INVERSION DEL SENTIDO DE FLUJO DEL AIRE*

Carlos Eugenio Oliveros-Tascón**
José Borges Pinheiro-Filho***

RESUMEN

Se desarrolló un programa de simulación de secado de café en capa fija con inversión del sentido de flujo de aire a partir del modelo matemático propuesto por Thompson et al., con el objeto de mejorar la eficiencia del silo-secador CENICAFE. Se estudiaron dos niveles de flujo de aire de secado (12 y $15 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), dos niveles de temperatura del aire de secado (50 y $60 \text{ }^\circ\text{C}$) y tres tiempos de inversión (7 , 9 y 12 horas). Se encontró que no existe una combinación de las variables antes indicadas que pueda ser considerada la mejor bajo aspectos de uniformidad en el contenido final de humedad, eficiencia y tiempo de secado. El secado con inversión del sentido del flujo de aire (sistema SIFA) presenta ventaja sobre el convencional ya que mejora la uniformidad del contenido de humedad final del producto. La eficiencia de secado se altera un poco al cambiarse del sistema SIFA al convencional o viceversa.

SUMMARY

OLIVEROS T., C. E.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee bean drying in fixed layers with inversion of air flow. *Cenicafé* (Colombia) 36(1):3-21. 1985.

In order to improve the efficiency of a bean dryer CENICAFE, and based upon the model of Thompson et al., it was developed a program for simulation of coffee bean drying in a fixed layer and with inversion of the air flow. Two air flow rates (12 , and $15 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), two drying air temperatures (50 and $60 \text{ }^\circ\text{C}$) and three inversion times (7 , 9 and 12 h) were included. It was not found a combination of these variables that could be considered the best in terms of uniformity of final moisture content, efficiency, and time of drying. Drying with inversion of the air flow (SIFA System) was advantageous over the conventional system because it gave a uniform final moisture content. The drying efficiency was rather altered by the change from SIFA to the conventional system and converse.

Additional Key Words: Drying simulation.

* Adaptación de la tesis presentada por el autor principal para optar al título de Master Scientiae en Ingeniería Agrícola en la Universidad Federal de Viçosa - Viçosa - Brasil, 1984.

** Asistente de la Sección de Ingeniería Agrícola del Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

*** Profesor adjunto del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa, Brasil.

INTRODUCCION

El sector agrícola tradicionalmente ha desempeñado un importante papel en la balanza de pago de los países en vía de desarrollo. Mediante las divisas obtenidas con la exportación de productos agrícolas, ha sido posible la compra de bienes de capital que son básicos para el desarrollo de todos los sectores de la economía de un país.

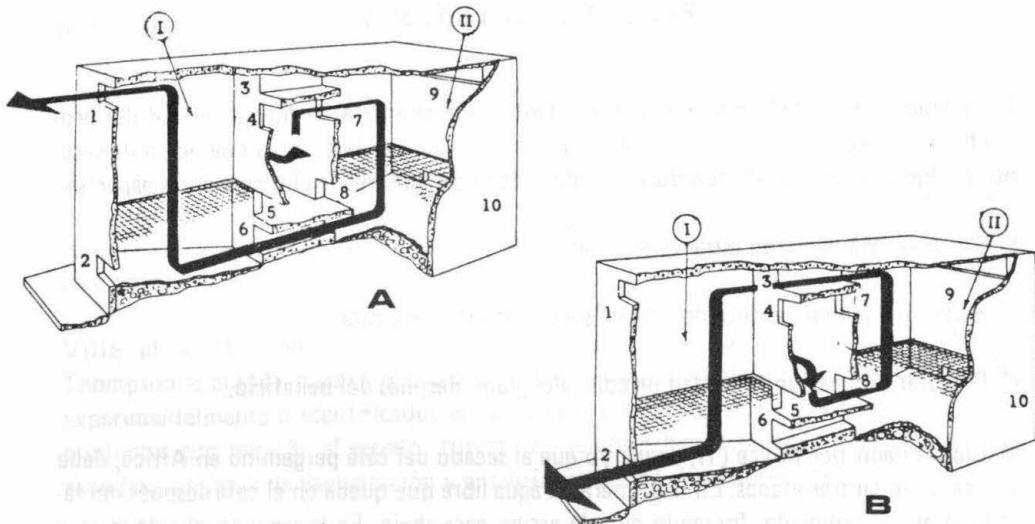
El Brasil, importante productor y exportador de productos agrícolas, es el mayor productor y exportador mundial de café. En 1981, el valor de las exportaciones de café alcanzó la cifra de 1.800 millones de dólares, o sea, 7,54% del total de la recaudación por exportaciones en ese año. Esta importante participación en la economía del país, estimula un permanente trabajo de investigación en las etapas de producción, procesamiento y comercialización, tratando de mejorar los actuales niveles de rendimiento y calidad final del producto.

A pesar de que en el Brasil han sido desarrolladas nuevas técnicas de secado y se encuentran a disposición de los agricultores varios tipos de secadores, el secado en patios es todavía muy utilizado, principalmente en las zonas agrícolas donde se concentran los productores de medios y bajos ingresos. Por otro lado los equipos de secado disponibles en el Brasil presentan, en general, baja eficiencia; no están proyectados para café y, generalmente son muy costosos, lo cual los hace incompatibles con el poder adquisitivo del pequeño y del mediano productor rural.

La heterogeneidad del contenido de humedad del producto es una de las desventajas de los secadores de capa fija. Algunos estudios que tratan de establecer las condiciones óptimas de secado han sido conducidos y sugieren la incorporación de nuevos equipos que, para las condiciones de los países en desarrollo, pueden ser inadecuados (2, 8, 11, 13). La técnica de inversión del flujo de aire, estudiada por Sabbah et al. (10) para secado de semilla de soya, debe ser investigada para otros productos.

En Colombia, el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE) desarrolló el silo-secador CENICAFE (Figura 1), compuesto de dos secciones intercambiables: una de secado y otra de presecado. Este secador es operado con inversión del flujo de aire 12 horas después del inicio del proceso. La capacidad de cada sección es de una tonelada de café en pergamino seco (12% o b.h.) y la altura inicial de la capa es de 0,4 m.

El aire de secado es calentado mediante la quema de combustible diesel, hasta una temperatura media de 50 °C, antes y después de la inversión, con un caudal específico de 60 m³. min⁻¹. tonelada de producto seco⁻¹. Cuando se cargan las dos secciones se necesita de un tiempo aproximado de 24 a 26 horas para secar el producto desde "seco de



- 1 a 10 Compuertas para obtener la dirección deseada del aire de secado;
 I Sección de presecado;
 II Sección de secado;
 A Dirección del aire en el inicio del secado;
 B Dirección del aire después de la inversión.

FIGURA 1.- Esquema del silo-secador CENICAFE (6)

agua" (café presecado con aproximadamente 40% b.h.) hasta pergamino seco (12% b.h. aproximadamente). El café en la sección de presecado necesita de 6 a 8 horas adicionales para secar hasta un valor medio de 12% b.h. (6).

El estudio de los efectos de los parámetros, temperatura, flujo de aire y tiempo de inversión sobre el sistema de secado con inversión del flujo de aire (SIFA) permitirá el mejoramiento de esta operación. Así, con base en las condiciones normales de operación del sistema SIFA, se realizó el presente trabajo con los siguientes objetivos:

- Analizar la sensibilidad del modelo matemático de simulación de secado en capa fija de grano, desarrollado por Thompson et al. (14) y adaptado para café en fruto, a las variaciones de temperatura del aire de secado, del flujo de aire de secado y de tiempo de inversión del sentido del flujo del aire.
- Mejorar operacionalmente el secador construido por CENICAFE, simulando el secado para diferentes niveles de temperatura del aire de secado, de flujo de aire de secado y de tiempo de inversión del sentido del flujo de aire.

REVISION DE LITERATURA

La operación de secado del café es importante para garantizar la buena calidad del producto final. Según la CATI, citada por Dorfman (5), para el éxito en la operación de secado, cualquiera que sea el método utilizado, deben ser observados los siguientes aspectos:

- a) Evitar la fermentación durante el secado.
- b) Evitar que la temperatura del aire de secado sea muy elevada.
- c) Procurar obtener uniformidad de color del grano después del beneficio.

McCloy, citado por Boyce (1), concluyó que el secado del café pergamino en Africa, debe ser realizado en tres etapas. En la primera, el agua libre que queda en el café después del lavado debe ser removida, forzando aire de arriba para abajo. En la segunda, el café se seca hasta que alcance una coloración oscura (19^o/o a 16^o/o b.h.). Con estas condiciones de humedad, el café puede ser almacenado en silos con sistema de aireación, por algún tiempo. En la tercera etapa, el producto puede ser secado en un silo o transportado hasta el secador utilizado en la segunda etapa. El mismo autor constató también que el efecto de la luz es importante y sugirió que durante algún punto en la operación de secado y por algún tiempo, el café debe quedar expuesto a la luz solar.

Los secadores mecánicos disponibles en el mercado son de varios tipos. Dependiendo del movimiento relativo del aire y de los granos, se tiene cuatro clases principales (2):

- a) Secador estacionario, sin movimiento del producto.
- b) Secador de flujos cruzados, en que el aire se mueve en una dirección perpendicular a la de los granos.
- c) Secador de flujos paralelos o concurrentes, en el cual el aire y los granos se mueven en la misma dirección y sentido.
- d) Secador de flujos en contracorriente en el cual el aire y los granos se mueven en sentido opuesto.

El secado, en cuanto a la aplicación de energía, puede ser clasificado en dos tipos (2):

- a) **Secado continuo:** en este método el aire de secado pasa a través de la masa granular durante todo el proceso.

- b) Secado parcelado o intermitente: en este método, hay períodos de interrupciones; los granos pueden quedar en reposo o recibir aire ambiental. Hay entonces una alternancia de aire caliente y aire ambiente o reposo, durante el proceso de secado.

Schoeder y Peart (11) utilizaron la programación dinámica para determinar los caudales específicos mínimos del aire en varias etapas del secado, en un secador de granos de flujo continuo. Con ésto investigaron mejores procedimientos para utilizar el aire de secado y para obtener mayor capacidad de secado.

Villa et al. (15) hicieron una adaptación del modelo matemático desarrollado por Thompson et al. (14), para café en fruto* y cacao. Para la adaptación fueron determinados experimentalmente o identificados en la literatura, los parámetros que caracterizan tales productos con relación al secado: curvas de equilibrio higroscópico, curvas de secado en capa fina, entalpía de vaporización y entalpía específica. Las expresiones son:

- a) Para el contenido de humedad de equilibrio del café,

$$Me = (P1R + P2R^2 + P3R^3) \exp ((P4 + P5R + P6R^2 + P7R^3 + P8R^4) (T + P9))$$

donde,

Ecuación 1

Me = Contenido de humedad de equilibrio; decimal, b. s.

R = Humedad relativa del aire; decimal.

T = Temperatura del aire de secado; °C.

P1 = 15272

P2 = -32478

P3 = 33341

P4 = -0,029458

P5 = 0,0016903

P6 = -0,013695

P7 = 0,013205

P8 = 0,0

P9 = 273

* Todo análisis de este trabajo se basa en el café en fruto, procesado en vía seca. Los resultados no son válidos para el café pergamino, procesado por la vía húmeda.

b) Para el secado del café en capa delgada:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -mq (P_{Vs} - P_v)^n (M - M_e)t^{q-1}$$

Ecuación 2

donde,

M = Contenido de humedad del grano, en el tiempo t; decimal b. s

P_{vs} = Presión de vapor saturado a la temperatura de secado; Pa

P_v = Presión de vapor del aire de secado, Pa

t = Tiempo de secado; h

m = 0,00187

n = 0,4614

q = 0,7683

c) Para determinar la energía necesaria para evaporar el agua en café (entalpía) (kJ .kg⁻¹):

$$L = (2500 - 2,38T) 0,9036 \exp (-6,032M)$$

Ecuación 3

d) Para la entalpía específica del café (kJ. kg⁻¹. K⁻¹).

$$C_p = 1,674 + 2,518 \left(\frac{M}{1 + M} \right)$$

Ecuación 4

En el secado convencional de productos en capa fija la temperatura del aire debe ser mantenida en niveles relativamente bajos, tratando de reducir el supersecado en las capas inferiores y el subsecado en las superiores. El aumento del caudal específico del aire, con el fin de disminuir la desuniformidad de la humedad final de la capa, está limitado por la capacidad del ventilador. Cuanto mayor sea la altura de la capa de producto menor deberá ser la temperatura del aire de secado y, dependiendo de la capacidad del ventilador, mayor deberá ser el caudal específico de aire.

Estas limitaciones del secado en capa fija, que son semejantes a las de secado con flujo cruzado (2, 13), han exigido un mayor trabajo en la investigación para tratar de optimizar el proceso. Algunas técnicas han sido sugeridas e incluso utilizadas buscando mejores resultados. La recirculación de los granos es una técnica considerada satisfactoria para mejorar la uniformidad de la humedad en la capa después del secado (9).

Sabbah et al. (10), investigaron el secado de semillas de soya con inversión del sentido del flujo de aire después de diferentes tiempos, buscando estudiar el efecto del tiempo de in-

versión sobre la uniformidad del contenido de humedad final del producto. Consideraron diferentes valores de temperatura y caudal específico del aire de secado y concluyeron que esta técnica de secado, denominada RDAF (Reversed Direction Air Flow), proporciona mejor uniformidad que el sistema convencional de secado en capa espesa.

Dávila et al. (4) estudiaron el secado de arroz con cáscara mediante inversión del flujo de aire (RDAF), utilizando el modelo matemático de simulación para secado de granos en capa fija desarrollado por la Universidad del Estado de Michigan. El modelo fue evaluado con pruebas de laboratorio para algunas de las condiciones de secado simuladas y las conclusiones a que llegaron fueron las siguientes:

1. El método RDAF reduce las diferencias en el gradiente final de contenido de humedad de los granos.
2. El consumo de energía aumenta hasta 10⁰/o en RDAF.
3. A temperaturas más altas del aire de secado, se requieren mayores flujos del aire para obtener una mayor uniformidad del contenido de humedad final.
4. Temperaturas bajas (35 °C y 43,3 °C) en combinación con caudales específicos de aire altos (41,4 a 55,2 m³ . min⁻¹ . ton⁻¹) son recomendadas con RDAF.
5. Temperaturas bajas (35 °C) y valores de humedad relativa próximos a 55⁰/o causaron menores diferencias de contenido de humedad final del producto, tanto en el sistema RDAF como en el convencional, pero el tiempo de secado aumenta.

MATERIALES Y METODOS

DESCRIPCION DEL MODELO DE THOMPSON.

Thompson et al (14) desarrollaron un modelo semi-empírico capaz de prever la influencia de las condiciones del aire de secado, del flujo de aire y de los granos, del espesor de la capa y del contenido de humedad inicial del producto en el proceso de secado.

En este estudio los autores utilizaron el procedimiento básico de dividir el proceso continuo de secado en varios pequeños procesos, simulándolos mediante cálculos consecutivos de los intercambios que ocurren durante pequeños incrementos de tiempo (Figura 2).

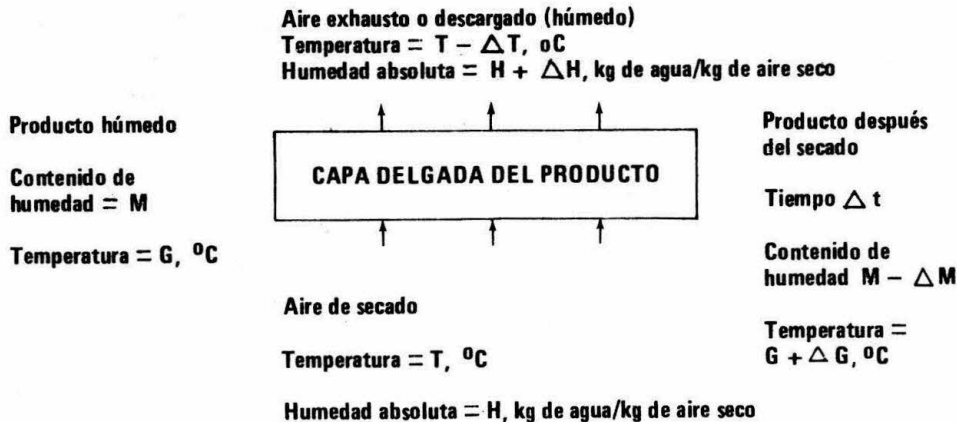


FIGURA 2.- Representación esquemática del proceso de secado de una subcapa de granos.

La figura 2 muestra el paso del aire de secado, a la temperatura T (°C) y la humedad absoluta H (kg de agua/kg de aire seco), a través de una capa delgada de grano con contenido de humedad M (decimal, b. s.) y temperatura G (°C), durante un intervalo de tiempo Δt (h). Durante ese intervalo es evaporada determinada cantidad de agua por unidad de materia seca, ΔM , y transportada por el aire, el cual aumenta su humedad absoluta a $H + \Delta H$ (kg de agua/kg de aire seco). Durante el secado, la temperatura del aire disminuye en un valor ΔT , proporcional al aumento de temperatura del grano ΔG (°C) y al enfriamiento evaporativo que acompaña la remoción de humedad.

La cantidad de agua retirada de los granos durante el secado es calculada mediante una ecuación de capa delgada (ecuación 2).

En el modelo de Thompson et al; fueron admitidas las siguientes hipótesis:

- a) El secado de una capa delgada está representado por la ecuación 2.
- b) La temperatura del grano es considerada igual a la temperatura del aire que lo envuelve.
- c) El contenido de humedad de equilibrio del café, para determinada condición del aire de secado, está representado por la ecuación 1.
- d) La entalpía de vaporización del agua del grano está representada por la ecuación 3.
- e) La entalpía específica del café está dada por el ecuación 4.

Con el objeto de simplificar la simulación, el secado fue dividido en subprocesos para determinar las variaciones que ocurren en una capa delgada, tales como la temperatura de equilibrio entre el grano y el aire, la humedad removida y el enfriamiento evaporativo del aire y del grano.

La temperatura de equilibrio, T_{eq} , es determinada por medio del siguiente balance de energía:

$$0,24 T_o + H_o (587,9 + 0,45 T_o) + C_p \cdot G_o = 0,24 T_{eq} + H_o (587,9 + 0,45 T_{eq}) + C_p \cdot T_{eq}$$

Ecuación 5

donde,

T_o = Temperatura del aire antes del secado ($^{\circ}C$).

H_o = Humedad absoluta antes del secado (kg de agua/kg de aire seco).

G_o = Temperatura del grano antes de secado ($^{\circ}C$).

El contenido de humedad de equilibrio, M_{eq} , es calculado por la ecuación 1, utilizando la temperatura de equilibrio (obtenida con la ecuación 5) y la humedad relativa del aire, determinada por medio de la temperatura de equilibrio y de la humedad absoluta del aire que está entrando a la capa.

La cantidad de agua perdida por el producto en el intervalo de tiempo Δt es calculada por la ecuación de capa delgada, ecuación 2.

Las condiciones finales del aire y del producto, después de t horas, son calculadas así:

1. La humedad perdida por el producto, $M = M_o - M_f$ es entregada al aire, lo cual incrementa su humedad absoluta en:

$$\Delta H = \frac{(M_o - M_f)}{100} r; H_f = H_o + \Delta H$$

Ecuación 6

donde,

r = relación producto/aire, (kg de materia seca/kg de aire seco).

2. La temperatura final es determinada mediante el balance de energía:

$$0,24 T_{eq} + H_o (587,9 + 0,45 T_{eq}) + C_p \cdot G_{eq} + C_w \cdot \Delta H \cdot G_{eq} = 0,24 T_f + H_f (587,9 + 0,45 T_f) + C_p \cdot T_f + L \cdot \Delta H$$

Ecuación 7

donde,

$$\begin{aligned} G_{eq} &= T_{eq} \text{ de la ecuación 5 (}^{\circ}\text{C)}. \\ C_w &= 1 \text{ (kcal. kg}^{-1} \text{ de agua }^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)}. \end{aligned}$$

Después de utilizar cada uno de los balances de energía, es necesario determinar si la temperatura y la humedad absoluta del aire son consistentes; esto es, si la humedad relativa determinada matemáticamente es inferior a 100⁰/o. En el caso de que esto no suceda será necesario realizar un nuevo balance de energía para simular la condensación de vapor de agua en los granos. La ecuación 8 presenta este balance, en que G_o y H_o representan el punto de estado no compatible y G_f , T_f y H_f constituyen el punto de estado a ser determinado:

$$\begin{aligned} 0,24 T_o + H_o (587,9 + 0,45 T_o) + C_p. G_o + (H_f - H_o) C_w. G_o = \\ 0,24 T_f + H_f (587,9 + 0,45 T_f) + C_p. T_f. \end{aligned}$$

Ecuación 8

En este balance de energía hay dos variables desconocidas: la temperatura final, T_f , y la humedad absoluta final H_f , una vez que se asume $T_f = G_f$.

En la determinación de estas dos variables se debe usar el método de interpolación hasta que se encuentren los valores de T_f y H_f , que corresponden a una humedad relativa muy próxima a 100⁰/o. Así, un nuevo contenido de humedad del producto, como consecuencia de la condensación de agua, puede ser determinado por la ecuación:

$$M_f = M_o - 100 \frac{H_f - H_o}{r}$$

Ecuación 9

donde,

M_o = Contenido de humedad inicial del grano, porcentaje, b. s.

Las condiciones sicrométricas del aire utilizadas en la simulación son mostradas en la Tabla 1.

La sección de secado del silo-secador CENICAFE, conforme se muestra en la Figura 1, es independiente de la sección de presecado, cualquiera que sean las condiciones de operación utilizadas en el sistema, lo cual justificó, en un primer trabajo, el estudio de solamente aquella sección.

Se evaluó en primer lugar, el comportamiento del modelo al compararse los resultados simulados de secado convencional de café, en capa fija, con los resultados experimentales obtenidos por Correa (3).

TABLA 1.- CARACTERISTICAS SICROMETRICAS DEL AIRE UTILIZADAS EN LA SIMULACION DE SECADO CON INVERSION DEL FLUJO DE AIRE.

Temperatura de bulbo seco	20 °C
Humedad relativa	60%
Humedad absoluta	0,01 kg agua/kg de aire seco

Entre las condiciones del aire de secado usadas por Correa se seleccionó la temperatura de 50 °C por ser la condición de interés e igual a la usada en el silo-secador CENICAFE. Las otras condiciones del aire y del grano son:

- a) Humedad relativa del aire = 10,90/o
- b) Flujo de aire = 9,2 m³ . min⁻¹ . m⁻²
- c) Altura inicial de la capa = 0,55 m
- d) Contenido de humedad inicial = 0,3856 b.s.

Las condiciones de simulación fueron basadas en las condiciones de operación, utilizadas en el silo-secador CENICAFE (Tabla 2).

En seguida se simuló el secado con las condiciones mostradas en la Tabla 2, intentando comparar los tiempos de secado para alcanzar un contenido de humedad del 130/o.

Se realizaron simulaciones para varias condiciones de temperatura del aire de secado, flujo de aire de secado y tiempo de inversión, tratando de identificar rangos viables de trabajo, sin tener en cuenta la calidad final del producto en taza, en este primer trabajo.

TABLA 2.- CONDICIONES DEL AIRE Y DEL PRODUCTO DURANTE EL SECADO DE CAFE EN EL SILO-SECADOR CENICAFE (6).

Aire	- Temperatura antes de la inversión	50 °C
	- Temperatura después de la inversión.	50 °C
	- Caudal específico antes de la inversión.	15 m ³ . min ⁻¹ . m ⁻²
	- Tiempo de inversión.	12 horas
Producto	- Contenido inicial promedio de humedad (café lavado).	50,0%/o b. h.
	- Contenido final promedio de humedad (café pergamino seco).	13,0%/o b. h.
	- Masa específica aparente promedio.	600,0 kg . m ⁻³

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 3 se presentan valores experimentales obtenidos por Correa (3) para las condiciones presentadas y también los resultados simulados por el modelo de Thompson et al. (14) adaptado para café en las mismas condiciones. Los errores absolutos (Tabla 3) muestran que el modelo de Thompson superestima el secado para esta condición. Es necesario que la metodología utilizada para la obtención de los datos experimentales sea modificada con relación a la utilizada por Correa, tratando de minimizar los disturbios que ocurren dentro de la capa de granos con las varias introducciones del calador para tomar las muestras y también hacer las determinaciones de contenido de humedad sin descartar cualquier cantidad de granos. También se necesita un mayor estudio de las propiedades físicas del café relacionadas con el secado, para perfeccionar el actual modelo matemático de simulación.

A pesar de estos problemas y partiendo del principio de que los resultados simulados son aceptables, se decidió simular las condiciones de secado para el sistema SIFA.

TABLA 3.- CONTENIDOS DE HUMEDAD EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR CORREA* (5), Y SIMULADOS POR EL MODELO MATEMATICO DE THOMPSON* et al (14), ADAPTADO PARA CAFE, EN LAS CONDICIONES: TEMPERATURA DE AIRE DE SECADO (TAR) = 50 °C; HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE SECADO (UAR) = 10,9%; FLUJO DEL AIRE DE SECADO (FAR) = 9,2 m³ . min⁻¹ . m⁻² Y ALTURA DE LA CAPA DE GRANOS (ALT) = 0,55 m.

Tiempo de secado (horas)	Contenido de humedad media Decimal, b. s.		Error absoluto
	Experimentales	Simulados	
0,0	0,3856	0,3856	0,00
0,5	0,3809	0,3746	-0,63
1,0	0,3624	0,3611	-0,13
2,0	0,3683	0,3346	-3,37
4,0	0,3298	0,2903	-3,95
6,0	0,2794	0,2552	-2,42
8,0	0,2468	0,2268	-2,00
10,0	0,2394	0,2034	-3,60
12,0	0,2141	0,1841	-3,00

* Los valores de contenido de humedad corresponden al café procesado por vía seca.

Con base en las condiciones de secado (Tabla 2) utilizadas antes y después de la inversión en el silo-secador CENICAFE, se simuló el secamiento para la sección de secado, en aquellas condiciones cuyos resultados se muestran en la Tabla 4 y las curvas en la Figura 3.

Las curvas de las cuatro subcapas de 10 cm cada una, muestran que después de 27,5 horas el café alcanzó un contenido medio de humedad de cerca de 0,15 b.s. decimal. Los contenidos de humedad máximo de 0,152 b. s. decimal, y mínimo de 0,145 b. s. decimal, indican homogeneidad aceptable en la práctica. Estos resultados representan los obtenidos por CENICAFE, en términos de contenido de humedad y homogeneidad del contenido de humedad final para algunos secadores CENICAFE pues existen variaciones de un sector a otro, debidas posiblemente a diferentes condiciones de operación de éstos.

Las curvas de secado convencional, simuladas para las mismas condiciones del aire, utilizadas en el silo-secador CENICAFE son mostradas en la Figura 4. Estas curvas que caracterizan bien el proceso de secado convencional en capa fija, muestran la ventaja de utilizar el sistema SIFA bajo el punto de vista de homogeneidad de contenido de humedad final. En términos prácticos no hubo diferencia de eficiencia para estas condiciones de secado, entre el sistema SIFA y el convencional, de respectivamente 8001 kJ. kg^{-1} de agua evaporada y 7559 kJ. kg^{-1} de agua evaporada.

Se realizaron simulaciones de secado en el sistema SIFA para las condiciones de las variables temperatura, flujo de aire de secado y tiempo de inversión del sentido del flujo de aire, mostradas en la Tabla 5, para tratar de identificar las mejores combinaciones en términos de eficiencia de secado, uniformidad del contenido final de humedad de la capa de producto y tiempo de secado.

Entre las mejores combinaciones de temperatura, flujo del aire de secado y tiempo de inversión del sentido del flujo de aire, mostradas en las Figuras 5 y 6, se aprecia que no existe una combinación entre estas variables del sistema SIFA, que pueda ser considerada la mejor bajo los aspectos de uniformidad del contenido de humedad final de la capa de producto, eficiencia energética del proceso de secado y tiempo total de secado.

TABLA 4.- CONTENIDOS FINALES DE HUMEDAD MAXIMO Y MINIMO (b.s. DECIMAL); EFICIENCIA (kJ. kg^{-1}) Y TIEMPO DE SECADO (h), SIMULADOS PARA LAS CONDICIONES DE OPERACION DEL SILO-SECADOR CENICAFE-

Contenido final de humedad		Eficiencia	Tiempo
Máxima	Mínima		
0,1519	0,1453	8 001	27,5

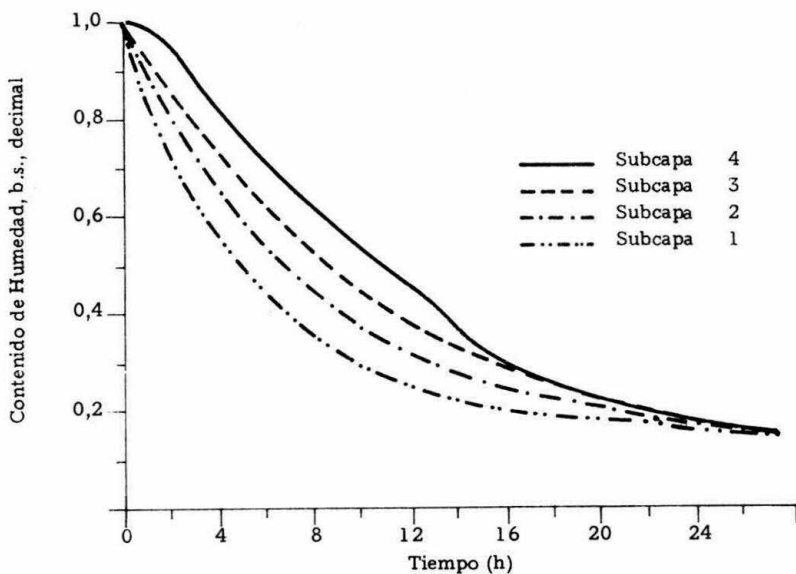


FIGURA 3. Curvas de secado simuladas para las condiciones: Tiempo de inversión de 12h, flujo del aire antes y después de la inversión de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, temperatura del aire antes y después de la inversión de 50°C , altura inicial de la capa de granos de 0,40 m y contenido de humedad inicial del producto de 1,00 decimal, b.s.

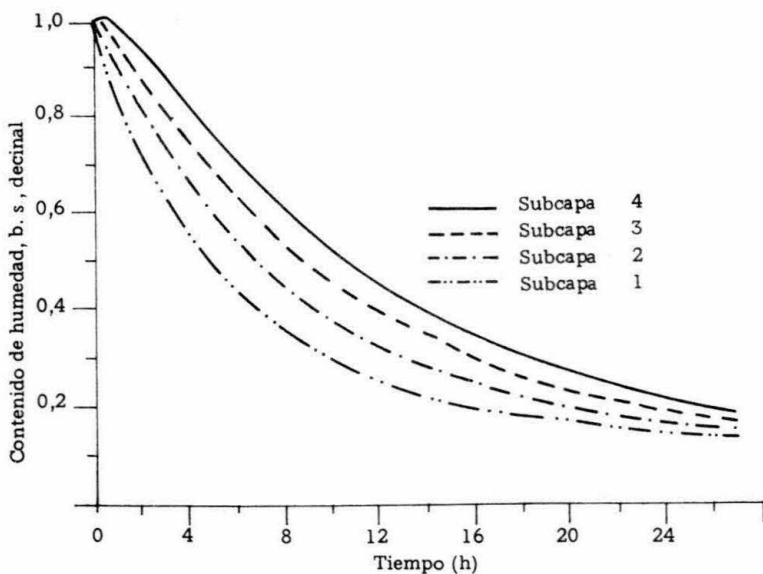


FIGURA 4.- Curvas de secado simuladas para las condiciones sin inversión del flujo de aire de secado de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, temperatura del aire de secado de 50°C , altura inicial de la capa de granos de 0,40 m y contenido inicial de humedad de 1,00, decimal, b.s.

TABLA 5.- CONDICIONES DE TEMPERATURA, FLUJO DE AIRE DE SECADO Y DEL TIEMPO DE INVERSIÓN DEL FLUJO DE AIRE (TINF) UTILIZADOS EN LA SIMULACION DE SECADO DE CAFE EN CAPA FIJA.

Variable	Antes de la inversión			Después de la inversión	
	50	60	70	50	60
Temperatura del aire (°C)	50	60	70	50	60
Caudal específico de aire ($m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$)	12	15		12	15
TINF (h)	7	9	12		

En las Figuras 5 y 6 se muestran los efectos sobre la uniformidad del contenido de humedad final de la capa de producto, producidos por las variaciones en el flujo de aire de secado de 12 a 15 $m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$ y en el tiempo de inversión del sentido de flujo de aire de 7, 9 y 12 horas, cuando la temperatura del aire de secado fue 50 °C y 60 °C, respectivamente. En términos prácticos no se alteró la uniformidad final de la humedad de la capa de producto cuando el tiempo de inversión fue de 9 ó 12 horas y la temperatura del aire de secado de 50 °C. Con un tiempo de inversión de 12 horas y temperatura del aire de secado de 60 °C se alcanza a caracterizar el proceso como secado en capa fija convencional, obteniéndose mayor desuniformidad en el contenido final de humedad de la capa de producto. La Tabla 6 muestra los incrementos energéticos con relación al secado en capa fija convencional, producidos al hacerse la inversión del sentido del flujo de aire con tiempo de 7, 9 y 12 horas. Los incrementos obtenidos pueden ser atribuidos a pérdidas de calor sensible en la capa de producto, manifestadas por enfriamiento una vez invertido el flujo de aire. Estos incrementos energéticos en el secado con inversión del sentido del flujo de aire también fueron observados por Dávila et al (5) y por Sabbah et al (11).

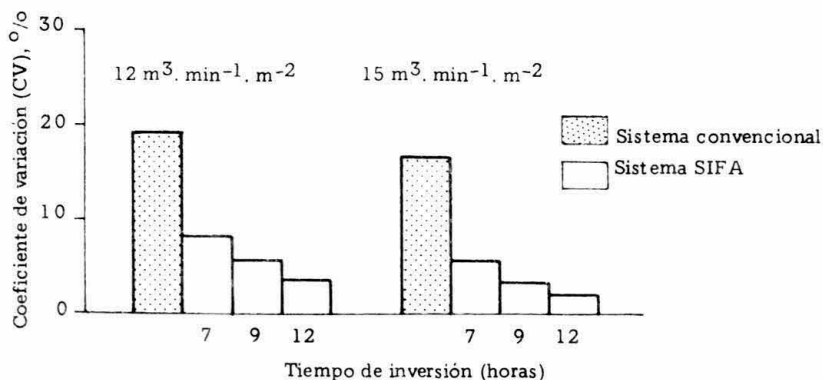


FIGURA 5. Efecto del flujo del aire sobre la uniformidad del contenido de humedad final de la capa, para una temperatura del aire de secado de 50°C.

TABLA 6. TIEMPO TOTAL DE SECADO DE UNA CAPA DE CAFE DE 0,40 m, CON DIFERENTES TEMPERATURAS, FLUJO DE AIRE Y TIEMPOS DE INVERSION.

Temperatura del Aire	50°C						60°C					
	12	9	7	12	9	15	12	9	7	12	9	15
Flujo (m ³ . min ⁻¹ . m ⁻²)												
Tiempo de Inversión (horas)	0*	7	9	12	0*	7	9	12	0*	7	9	12
Tiempo de Secado (horas)	28,75	29,75	29,75	29,75	27,0	27,75	27,5	27,5	17,25	18,0	17,75	16,0
Incremento de energía (°/o) con respecto al sistema convencional*.	—	3,42	3,42	3,39	—	2,71	1,95	1,91	—	4,06	2,89	2,66
												1,78
												1,65
												0,28

* Sin inversión del flujo de aire.

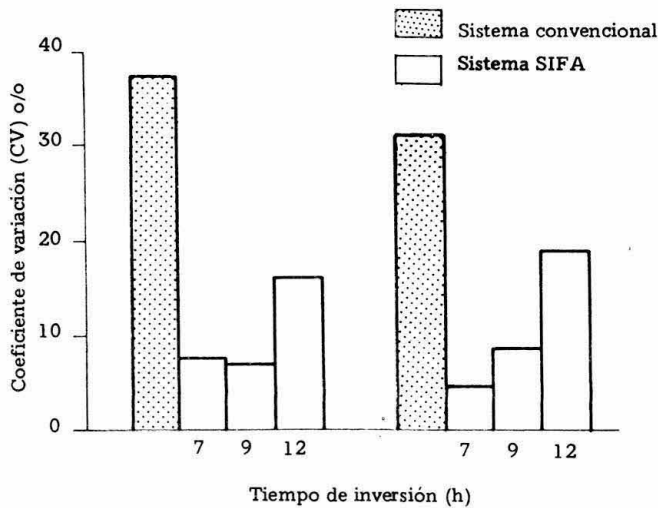


FIGURA 6. Efecto del flujo del aire sobre la uniformidad del contenido final de humedad de la capa, para una temperatura del aire de secado de 60°C.

CONCLUSIONES

El secado con inversión del sentido del flujo de aire presenta ventaja sobre el convencional ya que mejora la uniformidad del contenido final medio de humedad de la capa de producto. La eficiencia de secado es poco alterada al cambiarse del sistema de secado con inversión del flujo de aire al convencional o viceversa.

Desde el punto de vista práctico se obtienen iguales resultados en cuanto a la uniformidad de contenido final de humedad de la capa de producto (café procesado por vía seca), eficiencia y tiempo de secado, cuando se utilizan tiempos de inversión de 9 y 12 horas, temperatura de aire de 50 °C durante el secado y flujos de aire de 12 y 15 m³ . min⁻¹ . m⁻².

El tiempo óptimo de inversión del flujo de aire depende del tiempo total de secado; para las condiciones analizadas deberá estar en el rango de 9 a 12 horas y de 7 a 9 horas cuando las temperaturas del aire de secado sean 50 °C y 60 °C respectivamente.

Es más conveniente utilizar un flujo de aire de secado de $12 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ en el secador construido por CENICAFE (con café procesado por vía seca), porque, aunque la uniformidad del contenido final de humedad de la capa de granos es ligeramente afectada, la eficiencia del proceso de secado ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ de agua evaporada) se mejora significativamente.

BIBLIOGRAFIA

1. BOYCE, D. S. Single-stage bin drying of skin-dry parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research (Inglaterra)* 9(1):77-83. 1964.
2. BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying cereal grains. Connecticut (EE. UU.). The Avi Publishing Company. 1974. 265 p.
3. CORREA, P. C. Simulação de secagem de café em camada espessa. Vicoso, Universidade Federal de Vicoso. 1982. 47 p. (Tese de Magister Scientiae).
4. DAVILA, S. I.; CHEN, L. H.; WELCH, G. B. Simulation model for reversing direction airflow drying of rough rice. *Transactions of the ASAE (EE. UU.)* 26(6):1842-1848. 1983.
5. DORFMAN, E. Pré-secagem de café em barçaca com utilização de energia solar. Campinas. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola. 1980. 95 p. (Tese de Magister Scientiae).
6. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. *Manual del Cafetero Colombiano*. 4a. ed. Centro Nacional de Investigaciones de Café. CENICAFE. 1979. 209 p.
7. MINISTERIO DA INDUSTRIA E DO COMERCIO. INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFE. Anuario estatístico 1980-1981. Café do Brasil. Rio de Janeiro. MIC-IBC. 1981. 138 p. (No. 14).
8. PAULSEN, M. R.; THOMPSON, T. L. Effects of reversing airflow in a crossflow grain dryer. *Transactions of the ASAE (EE. UU.)* 16(3):541-545. 1973.
9. ROBERTS, D. E.; BROOKER, D. B. Grain drying with a recirculator. *Transactions of the ASAE (EE. UU.)* 18(1):181-184. 1975.
10. SABBAAH, M. A.; MEYER, G. E.; KEENER, H. M.; ROLLER, W. L. Reversed-direction-air-flow drying for soybean seed. *Transactions of the ASAE (EE. UU.)* 20(3):562-566. 1977.
11. SCHROEDER, M. E.; PEART, R. M. Dynamic programming method of air allocation in a grain dryer. *Transactions of the ASAE, (EE. UU.)* 10(1):96-99. 1967.
12. SOARES O., A. G.; SILVA, J. de S. e; DALPASQUALE, V. A.; OLIVEIRA, J. L. de. Secagem de café em secadores de fluxo concorrente. *Informe Agropecuario (Brasil)* 9(99):18-24. 1983.

13. STEVENS, G. R.; THOMPSON, T. L. Improving crossflow grain dryer design using simulation. Transactions of the ASAE (EE. UU.) 19(4):778-781. 1976.
14. THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying. A new model. Transactions of the ASAE (EE. UU.) 12(5):685-689. 1968.
15. VILLA, L. G.; ROA, G.; DAHAB, R. Simulação matemática da secagem de café e cacau. Campinas. Universidade Estadual de Campinas. Departamento de Engenharia Agrícola. 1978. 10 p.