

# EFICIENCIA DE LA ENERGIA SOLAR EN EL SECADO DEL CAFE, EMPLEANDO VARIOS ESPESORES DE GRANO Y TIEMPOS DE REMOCION

Alvaro Valencia-Merchán \*

## INTRODUCCION

En Colombia se producen anualmente 570.320 toneladas de café pergamino seco (9), a las cuales se les han extraído aproximadamente 500.000 toneladas de agua. Este secado se realiza en su mayor parte exponiendo al sol los granos de café recién lavado. Se estima que por este sistema se seca un 80%/o de la producción cafetera del país, y es utilizado por un 98%/o de los cafeteros en 297.000 fincas (9).

El fruto de café en el momento de cosecharlo contiene un 65%/o de su peso representado en agua. Con el sistema de beneficio de café por vía húmeda empleado en Colombia, se remueve la pulpa y el mucílago, y se obtiene el café pergamino, el cual tiene, después de lavado y escurrido, un 52%/o de humedad. Es necesario reducir el contenido de humedad del grano hasta un nivel que evite su deterioro (11%/o a 12%/o), para asegurar una buena

---

\* Jefe de la Sección de Ingeniería Agrícola del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Chinchiná, Caldas, Colombia.

conservación y para evitar el ataque de organismos que demeritan su calidad. También se ha demostrado que la exposición del grano a la luz solar, influye positivamente en la calidad (11).

La energía que la tierra recibe directamente del sol y por reflexión y refracción del cielo es muy considerable, aunque varía con la latitud, la altitud y las condiciones atmosféricas del lugar (8, 16, 17).

Se ha estimado que un metro cuadrado de tierra expuesta a la luz solar directa, recibe una energía equivalente a un HP o a un kilovatio, aproximadamente (16). Si se recibe una radiación de 580 calorías por centímetro cuadrado por día (5 horas), en 100 metros cuadrados se podría evaporar una tonelada de agua directamente si se tuviera una eficiencia del 1000/0. El agua presente en los granos es el principal medio para atrapar la energía que el sol envía a la tierra en forma de radiación, efectuándose así el secado.

Sivetz (16) anota que para el secado del café se puede aprovechar, en promedio, un 450/0 de la energía solar, y que solamente entre 7 y 130/0 puede ser usada en la evaporación del agua de materiales húmedos como el café.

En cuanto al espesor de la capa de café para secado al sol, se han recomendado entre 10 y 20 kilogramos por metro cuadrado (18). El Manual del Cafetero Colombiano (4) recomienda el secado al sol en capas de 3,5 cm de espesor; así, para secar el café hasta "seco de agua" (44 a 460/0 de humedad) se necesitan aproximadamente dos horas de sol y hasta "pergamino seco de trilla" (11 a 120/0 de humedad), se requieren 30 horas de sol. En términos de eficiencia por unidad de área, se ha comprobado que ésta aumenta con el espesor hasta los 10 cm, aunque el tiempo de secado se retarda (16).

También se ha demostrado que la remoción frecuente del grano durante el secado al sol, acorta el tiempo de secado en cerca de un 140/0 (16, 18).

Debido al bajo costo y gran utilización del secado al sol en Colombia, se quiere buscar la máxima eficiencia en el aprovechamiento de la energía solar, con el fin de estudiar y recomendar sistemas, materiales, tiempos de remoción y cantidades o espesores de grano, que reduzcan el tiempo y el espacio de secado.

El presente trabajo se realizó en Cenicafé, Chinchiná, con el fin de evaluar la eficiencia de la energía solar en condiciones locales, en términos de energía de radiación recibida y energía consumida en la evaporación del agua de los granos de café en el secado.

## MATERIALES Y METODOS

Los trabajos se efectuaron en Cenicafé, Chinchiná (Caldas), cuyos registros meteorológicos son los siguientes (3):

Latitud:	4° 52' N	Humedad relativa:	75%
Longitud:	75° 36' W	Evaporación:	583,3 mm
Altitud:	1.360 m.	Brillo solar anual:	1.956,9 horas
Presión barométrica:	651,7 (mm Hg)	Temperatura máxima promedio:	30,3° C
Precipitación anual promedio:	2.510,4 mm	Temperatura media:	20,6° C
Días lluviosos:	237	Temperatura mínima promedio:	14,1° C

El café se secó en carros con piso de madera y un área de ocho metros cuadrados cada uno. Se utilizó café pergamino lavado y escurrido que provenía de una sola lavada, clasificado por densidad en el canalón de correteo, correspondiendo a la calidad "tipo federación" o sea café pergamino con granos bien formados.

Los tratamientos evaluados fueron: cuatro cantidades de café lavado por metro cuadrado, que corresponden a cuatro espesores de grano y tres intervalos de remoción, según la tabla 1.

TABLA 1.- TRATAMIENTOS ENSAYADOS EN EL EXPERIMENTO DE SECADO DE CAFE.

Nº	Café lavado kg/m <sup>2</sup>	Espesor de la capa de secado mm	Intervalos de remoción horas
1	6,25	8	1/2
2	6,25	8	1
3	6,25	8	2
4	11,50	16	1/2
5	11,50	16	1
6	11,50	16	2
7	23,00	32	1/2
8	23,00	32	1
9	23,00	32	2
10	34,50	48	1/2
11	34,50	48	1
12	34,50	48	2

La distribución fue un diseño factorial de 4 X 3, en bloques al azar con cuatro repeticiones. Se utilizaron 12 carros con cuatro áreas de dos metros cuadrados cada uno, con un total de 48 áreas o subparcelas, en las cuales se colocó el café lavado, previamente pesado para iniciar el experimento.

El café se expuso al sol desde las 6:00 a.m. hasta las 6:00 p.m., cerrando los carros durante la noche y en los períodos de lluvia.

El secado del café se terminó cuando se observó que la almendra adquiría un color verde-azulado, característico de un café bien secado ( $11\%$  de humedad) (11, 19). A continuación, se pesó el café de cada tratamiento y luego se determinó la humedad del grano, sobre una muestra de 400 granos de café pergamino, con la ayuda de un determinador electrónico de humedad, empleando la constante dieléctrica del grano. Este equipo ha sido reportado como uno de los más adaptables al café y especialmente para trabajos de experimentación, por Boyce (2) y Menchu (12).

Los ensayos se efectuaron entre el 24 de octubre y el 6 de noviembre, período de máxima cosecha. Además, estos dos meses corresponden a las épocas más lluviosas, con una precipitación de 315,8 mm en octubre y 267,1 mm en noviembre, con el más bajo brillo solar: octubre con 143,7 horas y noviembre con 145,7 horas.

La eficiencia de la energía solar en el secado del café se evaluó por medio de las horas-sol empleadas en el secado de cada tratamiento. Estas se registraron en un "Heliógrafo tipo Campbell Stokes". Con los registros de la radiación solar en calorías/cm<sup>2</sup> por unidad de tiempo, evaluados en un "Actinógrafo Robitsch", se determinó la energía total recibida por cada tratamiento. Para obtener la eficiencia en términos de porcentaje de utilización de la energía recibida, se calculó la energía consumida con base en el calor latente de vaporización del agua (578 kilocalorías por kilogramo de agua evaporada a 35° C) y se multiplicó por los kilogramos de agua evaporada, para obtener la energía empleada en el secado.

## RESULTADOS

La temperatura media del grano, registrada durante el secado, fue de 35° C. Los datos de la humedad final de los diferentes tratamientos, no mostraron ninguna diferencia significativa, y el promedio general fue de 10,48% de humedad. Los pesos finales no mostraron diferencia significativa entre bloques ni entre los diferentes tiempos de remoción dentro de un mismo espesor de capa. Estos análisis indicaron que el experimento estuvo bien conducido y permitieron evaluar los tiempos de secado con relación a la energía recibida y consumida.

## Tiempo de secado.

Las horas-sol recibidas por cada tratamiento se presentan en la tabla 2. El análisis de varianza demostró diferencias altamente significativas para los tratamientos, tanto entre espesores de grano como entre tiempos de remoción.

TABLA 2.- HORAS-SOL RECIBIDAS PARA EL SECADO DE CAFE EN CAPAS DE DIFERENTES ESPESORES Y TRES INTERVALOS DE REMOCION.

Espesores	Intervalos de tiempo			Suma	Promedio por Tratamiento
	1/2 hora	1 hora	2 horas		
8 mm	16,02	16,28	17,20	49,50	16,50
16 mm	26,25	26,32	25,28	77,85	29,25
32 mm	37,95	38,80	41,80	118,55	39,52
48 mm	50,28	54,87	55,80	160,95	53,65
Suma	130,50	136,27	140,08	406,85	

También el análisis de varianza para las horas-sol recibidas, mostró una diferencia significativa para los bloques o repeticiones al nivel del 50/0 la cual fue debida al azar, ya que las demás medidas u observaciones no mostraron diferencias significativas para las repeticiones de cada tratamiento.

## Energía recibida.

Los registros de la energía solar recibida por cada tratamiento aparecen en la tabla 3. Es importante anotar que en la energía recibida como calorías por centímetro cuadrado por cada tratamiento, no hubo diferencia entre los bloques o repeticiones, como si existió en las horas-sol.

TABLA 3.- ENERGIA SOLAR RECIBIDA EN CENICAFE DURANTE EL SECADO DE CAFE AL SOL Y REGISTRADA POR EL ACTINOGRAFO EN CALORIAS POR  $\text{cm}^2$ .

Espesores	Intervalos de remoción			Suma	Promedio por tratamiento
	1/2 hora	1 hora	2 horas		
8 mm	1.173	1.198	1.290	3.661	1.220,33
16 mm	1.806	1.792	1.676	5.274	1.758,00
32 mm	3.016	3.081	3.373	9.470	3.156,67
48 mm	4.150	4.450	4.504	13.104	4.368
Suma	10.145	10.521	10.843	31.509	

El análisis estadístico de la cantidad de energía solar recibida por cada tratamiento, mostró una diferencia altamente significativa entre los tratamientos. Con el fin de estudiar en qué forma variaron éstos, se separaron los grados de libertad de los mismos, en espesores y tiempo, y se observó su variación y sus tendencias. Se encontró la mayor variación en los diferentes espesores, es decir, que al aumentar el espesor de la capa de grano, se tuvo una tendencia lineal altamente significativa. El mismo efecto, pero con diferencias menores, se observó al aumentar el tiempo entre las remociones. Estas dos tendencias son explicables debido a los mayores requerimientos de energía al aumentar ya sea los espesores de grano o los tiempos entre las remociones. Por otro lado, el análisis mostró que estos factores actuaron independientemente.

Las observaciones anteriores permitieron efectuar un balance práctico, para las futuras recomendaciones a los productores que emplean la energía solar para el secado del café. Sin embargo, con el fin de comprobar cuál de los tratamientos fue el más eficiente, desde el punto de vista energético, se evaluó la eficiencia que tenía cada uno de los tratamientos en el empleo de la energía solar, para efectuar el secado del café.

#### Energía consumida.

La energía necesaria para el secado fue calculada empleando la pérdida de peso de cada tratamiento, o sea el peso del agua removida multiplicado por 578. Este último valor es una constante que corresponde al calor latente de vaporización a  $35^{\circ}\text{C}$ , y está expresado en kilocalorías por kilogramo de agua evaporada.

## Eficiencia del secado.

Para calcular la eficiencia de cada uno de los tratamientos para aprovechar la energía solar en el secado del café, se tomó la energía utilizada en el secado y se dividió por la energía total recibida por cada uno de los tratamientos. Estos valores, expresados en porciones decimales, representan el porcentaje de la energía utilizada con respecto a la recibida y aparecen en la tabla 4. Luego, para el análisis estadístico, fueron transformados a Angulo-Arc. seno  $\sqrt{\text{porcentaje}}$ , y los resultados de este análisis se presentan en la tabla 5.

TABLA 4.- EFICIENCIA EN EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR EN EL SECADO DE CAFE PERGAMINO LAVADO.

Espesores	Intervalos de remoción			Suma	Promedio por tratamiento
	1/2 hora	1 hora	2 horas		
8 mm	0.1437	0.1407	0.1291	0.4135	0.1378
16 mm	0.1808	0.1820	0.1919	0.5547	0.1849
32 mm	0.2052	0.2031	0.1863	0.5846	0.1982
48 mm	0.2412	0.2240	0.2149	0.6801	0.2267

El análisis estadístico de la eficiencia de los diferentes tratamientos para aprovechar la energía solar, mostró que a medida que se aumenta el espesor de la capa de grano, expuesta al sol para su secado, se aumenta la eficiencia en el uso de la energía solar recibida, con una variación de tendencia cúbica altamente significativa. Cuando se aumentaron los tiempos entre las remociones, hubo una respuesta lineal altamente significativa pero con pendiente negativa, es decir, que al aumentar el intervalo entre las remociones se disminuyó la eficiencia del empleo de la energía solar recibida.

## DISCUSION

Los resultados obtenidos con el secado de café, mostraron una alta eficiencia en el empleo de la energía solar, para los diferentes espesores ensayados. Los límites de eficiencia estuvieron entre 12,91% y 24,12% siendo mayores que los datos reportados por Sivetz (16) los cuales fluctúan entre 7 y 13%.

Se observó que la eficiencia térmica en el secado del café al sol, se aumenta al incrementar el espesor de la capa de grano, pasando de 13,78% en el espesor de 8 mm hasta 22,67%.

TABLA 5.- ANALISIS DE LA EFICIENCIA EN EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR PARA EL SECADO DEL CAFE. DATOS TRANSFORMADOS A ANGULO - ARC. SENO  $\sqrt{\text{PORCENTAJE}}$ .

Factores de variación	G. L.	S. C.	C. M.	F
Replicaciones	3	1,74	0,58	
Tratamientos	(11)	(293,55)		
Espesores	( 3)	(277,59)		
Tendencia lineal	1	238,67	238,67	243,54 **
Tendencia cuadrática	1	14,57	14,57	14,87 **
Tendencia cúbica	1	24,35	24,35	24,85 **
Tiempos	( 2)	( 6,60)		
Tendencia lineal	1	6,55	6,55	6,68 **
Residuo	1	0,05	0,05	
Espesores/tiempo	6	9,36	1,56	
Error	33	32,38	0,98	
Total	47	327,67		

que fue el promedio de los tratamientos con 48 mm, o sea una capa equivalente a seis granos superpuestos. Estas observaciones concuerdan con Sivetz (16) sobre el aumento de la eficiencia hasta un espesor de 100 mm.

Con las recomendaciones de Knaus, citado por Wilbaux (18), de emplear cantidades menores a 15 kg de café lavado por metro cuadrado o sea un espesor aproximado de 10,5 mm; y las de Ronguet, también citado por Wilbaux (18) quien aconseja entre 10 y 20 kilogramos por metro cuadrado, se lograrían eficiencias menores en el empleo de la energía, aunque el tiempo de secado sea corto. La baja eficiencia de los espesores pequeños es debida principalmente a la pérdida de energía en los pisos donde se colocan los granos.

El análisis estadístico efectuado para los valores de la eficiencia en el empleo de la energía en los diversos tratamientos, mostró una variación de tendencia cúbica altamente significativa debida a los diferentes espesores; esto se explica por las variaciones de las condiciones climáticas presentadas en Cenicafé durante el ensayo. Tanto las horas - sol, como la radiación registrada por la estación meteorológica, fueron relativamente altas para los cuatro primeros días del ensayo; luego se presentaron días con lluvia y presencia de nubes (típico de estos meses) en los cuales bajaron las horas - sol y la radiación solar. Estas condiciones no permitieron lograr una eficiencia mayor del trata-

miento de 32 mm. En cuanto a la alta eficiencia del tratamiento de 48 mm, es explicable por el aumento en la cantidad de energía recibida, comparado con el espesor de 32 mm.

Los tiempos de remoción tuvieron una respuesta lineal altamente significativa, de tendencia negativa, para los valores de la eficiencia calculada. Estos resultados están de acuerdo con lo reportado por Sivetz (16) y Wilbaux (18), quienes anotan que una remoción frecuente acorta el tiempo de secado en un 14%. Aunque la ganancia en tiempo entre la remoción cada media hora comparada con aquellas efectuadas cada dos horas fue solo de 6.44% para el promedio de todos los tratamientos, no se puede comparar con lo reportado por los autores anteriores, por cuanto éstos no anotan los intervalos entre las remociones.

En este trabajo se corroboraron las recomendaciones del Manual del Cafetero Colombiano (4), de emplear un espesor de café de 3,5 centímetros, por cuanto el tratamiento de 32 mm de espesor tuvo una alta eficiencia de secado. Sin embargo, este tratamiento de 32 mm empleó 39,5 horas - sol, comparado con lo reportado en dicho Manual, de 32 horas.

## RESUMEN

Con el fin de evaluar la eficiencia de la energía solar en el secado de café al sol, se utilizaron diferentes tratamientos para secar café con 52% de humedad, hasta llevarlo a un 12% de humedad. Los tratamientos empleados fueron cuatro capas de granos (8, 16, 32 y 48 mm) y tres intervalos de remoción (1/2, 1 y 2 horas). Los secaderos empleados fueron carros de madera con un área de 2 m<sup>2</sup> por tratamiento.

Se evaluaron los pesos iniciales y finales de cada tratamiento, el tiempo de secado, la humedad final del grano, las horas-sol y la radiación recibida por cada uno de los tratamientos.

La temperatura media del grano durante el secado fue de 35° C y la humedad final promedio fue de 10,48%. La eficiencia en el aprovechamiento de la energía solar aumentó con el incremento del espesor de la capa de granos, de 13,78% (8 mm) a 22,67% (48 mm) aunque el tiempo de secado por metro cuadrado fue también mayor.

## SUMMARY

The efficiency of solar energy was evaluated in coffee drying by using four different treatments, intended to lower the moisture content of the beans from about 52% to 11%.

12<sup>o</sup>/0. The treatments consisted of four thicknesses of layers of beans (8, 16, 32 and 48 mm) and three intervals of removal (half, one and two hours). Wooden trays measuring two square meters each were used in each treatment.

In each treatment the following measurements were taken: initial and final weight of the beans, drying time, final moisture content of the bean, sun hours, and radiation.

During the process of drying the mean bean temperature was 35<sup>o</sup> C and the final average moisture content was 10.48<sup>o</sup>/0. The efficiency in the use of solar energy significantly improved with the increase in the thickness of the bean layer, from 13.78<sup>o</sup>/0 (8 mm) to 22.67<sup>o</sup>/0 (48 mm). As the bean layer became thicker the drying time also increased significantly.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1.- BOYCE, D. S. The determination of moisture in parchment coffee and green coffee beans with a dielectric-type moisture meter. The Journal of Agriculture (Puerto Rico) 44(4):176-193. 1960.
- 2.- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Anuario Meteorológico 1970. Suplemento. Chinchiná. p. 1.
- 3.- \_\_\_\_\_, Manual del Cafetero Colombiano. 3a. ed. Bogotá Editorial Bedout. 1969. pp. 351-369.
- 4.- KLEIBER, M. The fire of life. An introduction to animal energetics. New York, John Wiley and Sons, 1961. pp. 337-342.
- 5.- LOPEZ A., R. El cafetero medio colombiano. Revista cafetera de Colombia. 22(154):63-76. 1973.
- 6.- McCLOY, J. F. Mechanical drying of arabica coffee. Kenya coffee 24(280):117-133. 1959.
- 7.- MENCHU, J. F. Evaluación de un medidor rápido para la humedad del café en pergamino y en oro. Revista Cafetera (Guatemala) (92):11-24. 1969.
- 8.- SIVETZ, M. and FOOTE, H. E. Coffee processing technology. Estport, AVI, 1963. pp. 100-154.
- 9.- TETER, N. C. Bioingeniería. Bogotá, Instituto Colombiano Agropecuario. 1969. 75 p.

- 10.- WILBAUX, R. El beneficio del café. Roma, FAO, s. f. 232 p. (Boletín no oficial de trabajo Nº 20).
- 11.- WOOTTON, A. E.; VERKADE, F. A. and MITCHELL, H. W. The sun-drying of arabica coffee. Kenya coffee 33(391):261-271. 1968.