

Evaluación del poliestireno expandido como aislamiento térmico en el secado mecánico de café con eficiencia energética

Evaluation of expanded polystyrene for thermal insulation in energy-efficient mechanical coffee drying

Valentina Cruz-Ospina^{1*}, Eduardo Duque-Dussán¹ and Juan Rodrigo Sanz-Urbe¹

RESUMEN

Palabras clave:

Coffea arabica
Eficiencia térmica
EPS
Materiales aislantes
Transferencia de calor

El secado mecánico de café representa una de las etapas más críticas del procesamiento, tanto por su influencia en la calidad del grano como por la demanda de energética. En este estudio se evaluó el uso de poliestireno expandido (EPS) como material aislante en un secador mecánico de capa estática alimentado con cisco de café. Se comparó el control vs. el secador con EPS bajo un diseño experimental completamente aleatorio con tres repeticiones. Se midieron variables operativas como consumo energético, tiempos de secado, tasas de remoción de humedad y parámetros de transferencia de masa y energía en el grano. El uso de EPS redujo las pérdidas de calor en un 37,7% y permitió un ahorro de 13,9% en combustible y 9,5% en energía eléctrica, con una reducción del 12,6% en el tiempo total de secado. Además, la eficiencia del sistema aumentó en un 6,7% y la tasa de secado fue un 11,76% mayor frente al control. A nivel del grano, se observaron mejoras en coeficiente de difusión, calor específico y conductividad térmica. Estos resultados demuestran que el EPS es una alternativa accesible y eficaz para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad del secado mecánico de café.

ABSTRACT

Keywords:

Coffea arabica
Thermal efficiency
EPS
Insulated materials
Heat transfer

Mechanical coffee drying is one of the most critical stages of processing, both because of its influence on bean quality and because of its energy requirements. This study evaluated the use of expanded polystyrene (EPS) as an insulating material in a static layer mechanical dryer fed with coffee husks. The control was compared with the EPS dryer under a completely randomized experimental design with three replicates. Operating variables such as energy consumption, drying times, moisture removal rates, and mass and energy transfer parameters in the bean were measured. The use of EPS reduced heat losses by 37.7 % and resulted in savings of 13.9 % in fuel and 9.5 % in electrical energy, with a 12.6% reduction in total drying time. In addition, the efficiency of the system increased by 6.7% and drying rate was 11.8 % higher than the control. At the grain level, improvements were observed in the diffusion coefficient, specific heat, and thermal conductivity. These results demonstrate that EPS is an accessible and effective alternative for improving the energy efficiency and sustainability of mechanical coffee drying.

¹Disciplina de Postcosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Manizales, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7897-6632>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8045-6088>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9875-9426>

*Corresponding author: valentina.cruz@cafedecolombia.com

El proceso de transformación del fruto maduro a café seco implica operaciones sucesivas cuyo objetivo es reducir la humedad del grano hasta 10-12% b.h. que garantizan su estabilidad microbiológica y sensorial (Peñuela-Martínez and Sanz-Urbe, 2025). A diferencia del secado solar, los secadores mecánicos permiten mantener condiciones controladas de temperatura y caudal de aire, favoreciendo una operación continua, menores tiempos de procesamiento y mayor eficiencia térmica. Sin embargo, su elevado consumo de energía, agravado por deficiencias de aislamiento en las cámaras, reduce la eficiencia y aumenta los costos de operación (Duque-Dussán et al. 2023).

El aislamiento térmico se plantea como estrategia para mejorar el rendimiento de estos equipos, el uso de materiales aislantes como el Poliestireno Expandido (EPS), con baja conductividad térmica ($0.032\text{--}0.038\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$), ha mostrado reducir pérdidas de calor en secadores de gramos y disminuir el consumo energético específico cerca de un 20% (Jokiniemi and Ahokas, 2014). No obstante, su aplicación en el secado de café bajo condiciones reales de operación aún no ha sido evaluada, especialmente en contextos donde se emplean biocombustibles como el cisco.

En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto del EPS como aislante térmico en un sistema de secado mecánico de café, analizando su influencia sobre el comportamiento térmico del equipo, la eficiencia energética global y la transferencia de masa entre grano y ambiente. Para ello, se realizó una evaluación experimental considerando variables como el tiempo de secado, consumo de combustible y electricidad, dinámica de secado, distribución de temperatura y humedad en la cámara, y parámetros de eficiencia energética.

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación se realizó en el Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé (Manizales, Caldas a 1.306 m) durante julio y agosto del 2025, con temperaturas promedio de $21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa ambiental del 80,4% (Cenicafé, 2024). Se empleó *Coffea arabica* L. var. Cenicafé 1 procesado mediante beneficio húmedo. Fueron necesarios 70 kg de café pergamino húmedo por repetición, los cuales fueron distribuidos uniformemente sobre el compartimiento central del secador, considerando una altura de capa de 20 cm.

Equipo de secado mecánico

El equipo consistió en una estructura rectangular de acero al carbono con tres cámaras de secado (cada una con un volumen de $0,1103\text{ m}^3$ y $0,4798\text{ m}^2$ de área transversal). El aire de secado, impulsado por un ventilador a $50\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un caudal mínimo de $0,1\text{ m}^3\text{ min}^{-1}\text{ kg}^{-1}$ CPS (Parra-Coronado et al., 2017), se calienta usando un intercambiador alimentado con cisco de café. La cámara plenum con un volumen de $0,0408\text{ m}^3$, permitió la distribución del flujo hacia los compartimientos superiores. La temperatura de entrada fue controlada mediante una termocupla a la salida del ventilador y un sistema automático de dosificación de cisco.

Características del material aislante

Las paredes externas del equipo fueron recubiertas con una capa de 15 mm de EPS. La elección del material fue gracias a su amplio uso como aislante en distintos sectores industriales, gracias a sus propiedades aislantes como baja conductividad térmica y densidad, ligereza y facilidad de instalación, así como a su amplia oferta y bajo costo (Ali et al. 2024).

Procesamiento y variables medidas

El secado se controló hasta $11\pm 1\%$ en base húmeda (b.h.), midiendo temperatura y humedad relativa con termohigrómetros UNI-T UT330B-IP67 dentro y fuera de la cámara, un lente térmico FLIR Leptón 3.5 para la temperatura superficial del equipo y un sensor LM35 para la temperatura de grano. Los contenidos de humedad se determinaron con Gravimet SM®, Kett PM-600 ($\leq 25\%$ b.h.) y método de estufa (ISO 6673:2003). La cámara se dividió en tres sectores (izquierda, centro y derecha), con mediciones cada hora, volteos cada 6 h y registro del tiempo total, consumo de combustible y energía

Evaluación del rendimiento térmico

Se evaluó la eficiencia térmica real del sistema (η_{HX}) a partir de la ecuación 1 (Parra-Coronado et al. 2017) usando los valores experimentales de ΔT y el consumo de combustible ($\dot{m}_f$), junto con las constantes de calor específico del aire ($C_{p,air}$) ($1,005\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$) y el poder calorífico inferior del combustible (h_B) (18.550 kJ kg^{-1}) (Duque-Dussán et al. 2025), las pérdidas de calor hacia el ambiente por convección, radiación y conducción a través de la estructura se incluyeron de forma implícita en la eficiencia térmica calculada.

$$\eta_{HX} = \frac{\dot{m}_a \times C_{pair} \times \Delta T_a}{\dot{m}_f \times h_B} \quad (1)$$

El consumo de combustible fue registrado al finalizar cada ciclo, el balance energético se obtuvo a partir del consumo total de energía (E), considerando la potencia del motor (P) para el ventilador y el suministro automático de combustible, además del tiempo total del proceso (t).

Parámetros de grano

Se calculó el coeficiente de difusión (D), transferencia de calor (h_c), calor específico del grano (C_p) y conductividad térmica (K) según los modelos adaptados por (Duque-Dussán et al. 2022).

Diseño experimental y análisis de datos

Se planteó un diseño experimental completamente aleatorio, con tres repeticiones ($n = 3$), completando un total de seis ciclos de secado. Se realizaron análisis de varianza junto con test post hoc cuando se presentaron diferencias significativas. El procesamiento estadístico se realizó en R (v.4.3.0) y las gráficas en SigmaPlot (v.11.0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones ambientales

Como se esperaba, las temperaturas más altas se registraron en la cámara plenum, con valores mayores bajo condiciones de aislamiento ($49,1 \pm 1,9$ °C frente a

$47,5 \pm 3,4$ °C sin EPS). Posteriormente, una vez el aire de secado traspasó la cama de café, el lado izquierdo presentó las temperaturas más elevadas en ambos tratamientos ($39,4 \pm 6,1$ °C con EPS y $39,0 \pm 5,2$ °C control); mientras que, las temperaturas más bajas se obtuvieron en el centro ($39,0 \pm 5,9$ °C control y $38,8 \pm 5,9$ °C con EPS). En cuanto a la humedad relativa, ambos tratamientos presentaron mayores valores al lado derecho con $54,6 \pm 16,9\%$ y $54,2 \pm 17,6\%$ para control y EPS, respectivamente; y, los menores valores se registraron para el lado izquierdo en el control con $52,0 \pm 16,1\%$ y en el centro para el tratamiento con EPS con $50,9 \pm 18,2\%$. La humedad promedio de la cámara plenum se redujo con el uso del aislamiento, pasando de $32,5 \pm 6,4\%$ para el control a $30,0 \pm 2,4\%$ mediante el EPS. El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los tratamientos para los sectores centro, derecha y plenum. Estos resultados demuestran que el material aislante optimiza las condiciones de secado al aumentar la temperatura y reducir la humedad, promoviendo una mayor uniformidad del microclima en la cámara (Abueluor et al. 2023).

Rendimiento térmico del equipo

El análisis de eficiencia mostró que el aislamiento térmico redujo el consumo de combustible, energía y tiempo de operación en 13,9%, 9,5% y 12,6%, respectivamente. Esto generó un incremento en la eficiencia del sistema del 6,7% (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores eficiencia y consumo energético del secador de café bajo tratamientos con y sin aislamiento térmico.

Variable	Tto	Media	CV	Gl	F	p-value	NS
Eficiencia del Sistema (%)	Control	43,23	5,12 %	1,4	3,39	0,1390	ns
	EPS	46,14	6,40 %				
Tiempo de Secado (h)	Control	17,00	5,88 %	1,4	4,000	0,1160	ns
	EPS	15,67	3,69 %				
Consumo Eléctrico (kWh)	Control	14,31	5,68 %	1,4	6,249	0,0668	ns
	EPS	12,95	4,74 %				
Consumo Cisco (kg)	Control	52,07	7,86 %	1,4	4,791	0,0923	ns
	EPS	44,83	7,05 %				
Rendimiento (kgCisco kgCPS ⁻¹)	Control	1,49	9,16 %	1,4	3,991	0,1160	ns
	EPS	1,27	8,06 %				

Durante las pruebas control, las paredes internas y externas alcanzaron temperaturas promedio de $45,4 \pm 4,9$ °C y $44,0 \pm 4,1$ °C. Con el uso de EPS, la temperatura interna se elevó a $48,8 \pm 3,9$ °C, mientras que la externa descendió a $30,4 \pm 4,7$ °C, lo que representó una reducción del 37,7 % en pérdidas térmicas ($P \leq 0,0001$). Este comportamiento concuerda con estudios que evidencian cómo los materiales aislantes mejoran la eficiencia térmica, estabilizan las condiciones internas y favorecen la uniformidad del secado, además de contribuir al ahorro energético (Tyagi et al. 2024).

Desempeño del proceso de secado

Con EPS, la remoción de humedad fue 11,76 % más rápida, reduciendo el tiempo de secado de $17,0 \pm 1,0$ h a $15,7 \pm 0,6$ h, con contenidos finales de $11,58 \pm 0,4$ % y $11,51 \pm 0,4$ % (b.h.), respectivamente. Las mayores tasas de secado se registraron en el lado izquierdo, con $0,58 \pm 0,8$ h⁻¹ para el control y $0,61 \pm 0,9$ h⁻¹ con EPS. Valores similares fueron obtenidos por Duque-Dussán et al. (2023) usando un secador híbrido.

Propiedades térmicas del grano

El EPS mejoró significativamente el coeficiente de difusión, calor específico y conductividad térmica, indicando mayor capacidad del grano para almacenar energía y facilitar la migración de humedad. El coeficiente de transferencia de calor no presentó diferencias, aunque la mejora en las condiciones ambientales contribuyó indirectamente a su desempeño.

CONCLUSIONES

Los hallazgos del estudio demuestran que el poliestireno expandido (EPS) es una solución viable y efectiva para incrementar la eficiencia energética del secado mecánico de café. El aislamiento térmico proporcionado por el EPS optimiza las condiciones operativas, resultando en una reducción significativa del consumo de combustible y una disminución de los tiempos de secado. Estas mejoras, junto con la accesibilidad y el bajo costo del material, validan el EPS como una alternativa práctica para la optimización térmica en sistemas de secado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Disciplina de Poscosecha de Cenicafé por el acompañamiento técnico y la disponibilidad

de las instalaciones, al Taller de Mecánica por el apoyo en la adecuación y mantenimiento del equipo experimental; y especialmente, a José Gilmar Carmona Villegas y Juan Sebastián Rivera Rodríguez por su colaboración durante el desarrollo de las pruebas y la recolección de datos. Esta investigación fue financiada por las acciones de investigación e innovación Horizonte EUSPA-2022-SPACE de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n.º 101131859 (COMUNIDAD), en el marco del proyecto POS 103008.

REFERENCIAS

- Abueluor AAA, Amin MT, Abuelnour MA and Younis O (2023) A comprehensive review of solar dryers incorporated with phase change materials for enhanced drying efficiency. *Journal of Energy Storage* 72: 108425. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108425>
- Ali A, Issa A and Elshaer A (2024) A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. *Sustainability* 16(20): Article 20. <https://doi.org/10.3390/su16208782>
- Cenicafé (2024) Anuario (2023) Anuario Meteorológico Cafetero. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/anuario_meteorologico/issue/view/2094
- Duque-Dussán E, Bappah M, Sanz-Urbe JR and Nainggolan EA (2025) Thermo-Chemical Characterization of Coffee Husk from a New Variety (*Coffea arabica* L. var. Cenicafé 1) for Biofuel Production. *Scientia Agriculturae Bohemica* 56(1). <https://doi.org/10.7160/sab.2025.560101>
- Duque-Dussán E, Sanz-Urbe JR and Banout J (2023) Design and evaluation of a hybrid solar dryer for postharvesting processing of parchment coffee. *Renewable Energy* 215: 118961. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118961>
- Duque-Dussán E, Villada-Dussán A, Roubik H and Banout J (2022) Modeling of Forced and Natural Convection Drying Process of a Coffee Seed. *Journal of the ASABE* 65(5): 1061-1070. <https://doi.org/10.13031/ja.15156>
- Jokiniemi H, and Ahokas JM (2014) Effect of heat insulation on the energy consumption of recirculating mixed-flow batch grain dryer. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 16(3): 205-213.
- Parra-Coronado A, Roa-Mejía G, Oliveros-Tascón CE and Sanz-Urbe JR (2017) Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino (Vol. 1). Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/libros/publicaciones_optimizacion_operacional_de_secadores_mecanicos_para_cafe
- Peñuela-Martínez AE and Sanz-Urbe JR (2025) Evite el deterioro del grano manejando adecuadamente la temperatura del aire de secado. *Avances Técnicos Cenicafé* 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0576>
- Tyagi VV, Pathak SK, Chopra K, Saxena A, Kalidasan B, Dwivedi A, Goel V, et al (2024) Sustainable growth of solar drying technologies: Advancing the use of thermal energy storage for domestic and industrial applications. *Journal of Energy Storage* 99: 113320. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113320>