

Análisis teórico de la transferencia de calor y masa durante el secado del café: Principios físicos y perspectivas de modelado

Theoretical analysis of heat and mass transfer during coffee drying: Physical principles and modeling perspectives

Eduardo Duque-Dussán^{1*} and Juan R. Sanz-Urbe¹

RESUMEN

Palabras clave:

Conducción de calor
Difusión de humedad
Modelado matemático
Secado de granos
Simulación de proceso

El secado del café es una etapa crítica en la postcosecha, orientada a reducir la humedad del grano para su conservación y calidad. Este estudio presenta un análisis teórico de la transferencia acoplada de calor y masa, modelando el grano como un sistema poroso anisotrópico con geometría variable. Se aplican las leyes de Fourier y Fick, junto con herramientas tensoriales y ecuaciones en derivadas parciales en coordenadas esféricas. Los resultados evidencian cómo la distribución espacial de temperatura y humedad condiciona la eficiencia del secado e identifica zonas críticas de reabsorción. Se concluye que una modelación rigurosa puede optimizar tecnologías de secado y apoyar el desarrollo de sistemas de simulación aplicables a diversos escenarios agroindustriales.

ABSTRACT

Keywords:

Heat conduction
Moisture diffusion
Mathematical modeling
Grain drying
Process simulation

Coffee drying is a critical postharvest stage aimed at reducing bean moisture to safe levels for preservation and quality. This study presents a theoretical analysis of coupled heat and mass transfer, modeling the bean as a porous, anisotropic system with variable geometry. Fourier's and Fick's laws are applied alongside tensor calculus and partial differential equations in spherical coordinates. Results show that spatial distributions of temperature and moisture strongly influence drying efficiency and reveal critical zones of reabsorption. The study concludes that rigorous modeling can support the optimization of drying technologies and the development of simulation systems for diverse agro-industrial contexts.

¹Disciplina de Postcosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Manizales, Colombia.

*Corresponding author: Eduardo.Duque@cafedecolombia.com

El secado del café pergamino (*Coffea arabica* L.) constituye una de las etapas más críticas y complejas en la postcosecha, ya que define la estabilidad del grano y la conservación de su calidad sensorial (Abreu et al. 2025). Durante este proceso, el grano experimenta transformaciones térmicas e higroscópicas altamente acopladas, particularmente en la fase en la que la almendra se contrae y se forma una capa de aire entre esta y el pergamino, lo que introduce nuevas resistencias al transporte de calor y masa (Duque-Dussán et al. 2022). A pesar de los avances en modelos unidimensionales, la geometría irregular y la anisotropía del grano real requieren enfoques más robustos. En este trabajo se desarrolla un modelo teórico tridimensional con formulación tensorial, coordenadas elipsoidales y condiciones dinámicas de frontera, para simular con mayor fidelidad la evolución de temperatura y humedad en un sistema multicapa. Este modelo busca aportar herramientas para optimizar el control térmico en tecnologías de secado adaptadas a condiciones tropicales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se formuló un modelo tridimensional para simular la transferencia acoplada de calor y masa en un grano de café pergamino durante el secado. El grano fue representado como un sistema multicapa con geometría elipsoidal: almendra, capa de aire intermedia y endocarpio (pergamino). La evolución térmica se modeló mediante la Ley de Fourier y el transporte de humedad mediante la Ley de Fick (Tian et al. 2021), ambos en formulación tensorial:

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T, \quad \vec{j} = -D_{\text{eff}} \cdot \nabla X \quad (1)$$

Donde $\vec{q}$ y $\vec{j}$ son los vectores de flujo térmico y másico, T es la temperatura, X el contenido de humedad (b.s.), y k , D_{eff} son tensores de segundo orden que representan la anisotropía del medio. La matriz de conductividad térmica y difusión en coordenadas locales se representó como:

$$D_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} D_r & 0 & 0 \\ 0 & D_\theta & 0 \\ 0 & 0 & D_\phi \end{pmatrix}, k = \begin{pmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_\theta & 0 \\ 0 & 0 & k_\phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

donde r , θ y ϕ son las componentes radiales y angulares del tensor, ajustadas según la estructura porosa y orientación del tejido vegetal. La dinámica térmica fue expresada también mediante la ecuación de conducción dependiente del tiempo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (3)$$

donde $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$, es la difusividad térmica, dependiente de la conductividad térmica k [W/m K], la densidad ρ [kg m⁻³], y la capacidad calorífica c_p [J/kg K], todas las variables en función de la humedad local. Las condiciones iniciales se fijaron como homogéneas: $T_0 = 35^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,53$ b.h. (Andrade et al. 2024). La capa de aire se modeló como una región interna con baja conductividad y densidad, cuya aparición ocurre cuando $X < 0,43$. Las condiciones de frontera térmica y másica se expresaron:

$$-k \nabla T \cdot \vec{n} = h_T (T_\infty - T_s), \quad -D_{\text{eff}} \nabla X \cdot \vec{n} = h_m (X_\infty - X_s) \quad (4)$$

donde h_T y h_m son los coeficientes convectivos dependientes de la velocidad y humedad relativa del aire, y T_s , X_s corresponden a las condiciones superficiales del grano.

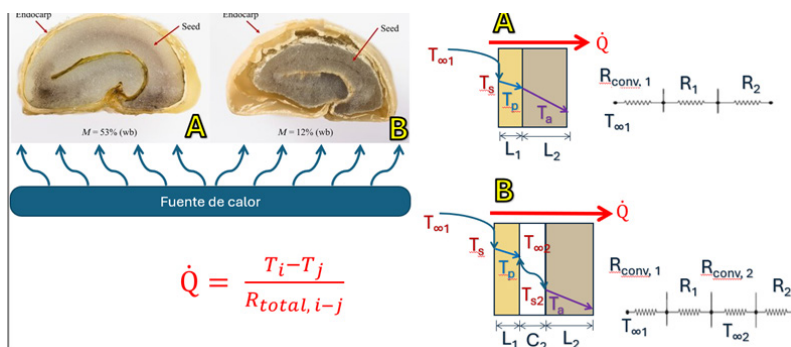


Figura 1. Evolución estructural del grano de café durante el secado. A: grano húmedo sin separación almendra-pergamino. B: grano seco con capa de aire intermedia.

La solución se implementó mediante el método de elementos finitos en ABAQUS® con acoplamiento térmico-higroscópico en MATLAB®, utilizando mallas refinadas en las interfaces aire–almendra y pergamino–aire (Figura 1). Las propiedades físicas se actualizaron dinámicamente en función del contenido de humedad por interpolación no lineal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones del modelo acoplado de transferencia de calor y masa permitieron visualizar la evolución térmica e higroscópica del grano de café pergamino durante el secado. Se identificó una fase crítica cuando la almendra alcanza una humedad cercana al 43 % (b.h.), lo cual genera su contracción volumétrica y la formación de una capa de aire entre ella y el pergamino.

Esta transformación morfológica convierte al sistema en una estructura tricapa con nuevas resistencias térmicas y difusivas, alterando el flujo interno de energía y materia (Burmester & Eggers 2010). Durante esta etapa, los gradientes térmicos $|\nabla T|$ y de contenido de humedad $|\nabla X|$ alcanzan sus máximos valores:

$$|\nabla T|_{\max} \approx 4.5 \text{ K/mm}; |\nabla X|_{\max} \approx 0.08 \text{ kg/kg.mm}$$

ubicados en las interfaces aire–almendra y aire–pergamino. Esta configuración genera una acumulación energética localizada, donde más del 70 % del flujo térmico se concentra en menos del 25 % del volumen total, lo que incrementa el riesgo de tensiones internas y reabsorciones localizadas de humedad (Anokye-Bempah et al. 2023).

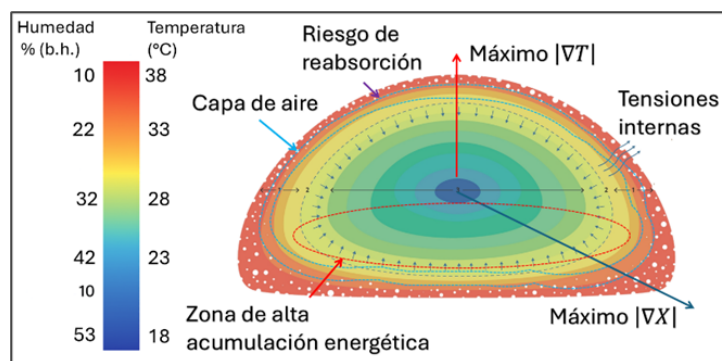


Figura 2. Distribución de temperatura y humedad en el grano de café durante el secado. Se destacan los gradientes máximos, la capa de aire y zonas críticas de acumulación energética.

La Figura 2 muestra un corte transversal del grano simulado, con vectores de flujo térmico y másico convergiendo en la región intermedia. El color indica simultáneamente temperatura y humedad (azul: frío/húmedo, rojo: caliente/seco), destacando zonas críticas de acumulación energética, reabsorción y tensión estructural como:

$$E_{\text{acumulada}} \propto \int_V (|\tau_{\text{térmica}}|^2 + |\tau_{\text{hídrica}}|^2) dV \quad (5)$$

donde los tensores de esfuerzo térmico e higroscópico se definieron como:

$$\tau_{\text{total}} = \nabla \otimes \vec{q} + \nabla \otimes \vec{j} \quad (6)$$

Este análisis permitió identificar que la región más crítica se localiza en el borde interno de la almendra, donde la capa de aire intermedia actúa como un

aislante térmico parcial debido a su baja conductividad y espesor reducido. Estos hallazgos respaldan la necesidad de implementar estrategias de secado con control dinámico de temperatura y humedad relativa. En particular, ajustar la velocidad del aire para incrementar el coeficiente convectivo superficial h_r podría mitigar las resistencias impuestas por la capa de aire, favoreciendo la homogenización térmica sin comprometer la integridad estructural del grano (Benlioğlu et al., 2023). Además, este modelo constituye una base para desarrollar sistemas predictivos de control que optimicen simultáneamente la eficiencia energética y la calidad final del café pergamino.

CONCLUSIÓN

El modelo teórico permitió representar con precisión la transferencia acoplada de calor y masa en un grano de café multicapa con geometría variable. Las

simulaciones identificaron una fase crítica del secado, donde se concentran los mayores gradientes térmicos e higroscópicos, reduciendo la velocidad de secado y elevando el riesgo de reabsorción. El análisis tensorial reveló zonas críticas de transporte, fundamentales para diseñar estrategias de control dinámico y optimizar tecnologías de secado adaptadas a sistemas multicapa y aplicaciones industriales.

REFERENCIAS

- Abreu DJ M de, Lorenço MS, Machado GG L, Silva JM, Azevedo EC de and Carvalho EEN (2025) Influence of drying methods on the post-harvest quality of coffee: Effects on physicochemical, sensory, and microbiological composition. *Foods* 14(9): 1463. <https://doi.org/10.3390/foods14091463>
- Andrade PS, Duarte CR and Barrozo MAS (2024) An innovative dryer for Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) drying: Investigating heat and mass transfer. *Drying Technology* 42(6): 1065–1076. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2341399>
- Anokye-Bempah L, Han J, Kornbluth K, Ristenpart W and Donis-González IR (2023) The use of desiccants for proper moisture preservation in green coffee during storage and transportation. *Journal of Agriculture and Food Research* 11: 100478. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100478>
- Benlioğlu MM, Karaağaç MO, Ergün A, Ceylan İ and Ali İHG (2023) A detailed analysis of a novel auto-controlled solar drying system combined with thermal energy storage concentrated solar air heater (CSAC) and concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T). *Renewable Energy* 211: 420–433. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.108>
- Burmester K and Eggers R (2010) Heat and mass transfer during the coffee drying process. *Journal of Food Engineering* 99(4): 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.021>
- Duque-Dussán E, Villada-Dussán A, Roubík 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>
- Tian Y, Lin G and Guo J (2021) Analysis of mass diffusion theory and models for high-temperature multi-component gases. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 181: 121994. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121994>