

Cinética del secado de coco por radiación

Modelling of thin layer radiation drying of coconut

Manuel Umaña-Calderón¹, Janice Muñoz-Mena²,
Yuliana Pacheco-Retana³, Guillermo Vargas-Elías⁴

Umaña-Calderón, M; Muñoz-Mena, J; Pacheco-Retana, Y;
Vargas-Elías, G. Cinética del secado de coco por radiación.
Tecnología en Marcha. Vol. 32, Especial. XIII CLIA. Abril
2019. Pág 115-121.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4269>



- 1 Ingeniero Agrícola. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Correo electrónico: manuel.umcal@gmail.com
- 2 Escuela de Agronomía. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Correo electrónico: janice.munoz@ucr.ac.cr
- 3 Escuela de Zootecnia. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Correo electrónico: pachecoretanayuliana@gmail.com
- 4 Ingeniero Agrícola. Centro para Investigación en Granos y Semillas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Correo electrónico: gvargase@gmail.com

Palabras clave

Deshidratación de coco; Transmisión de calor por radiación; Secado de capa delgada; Energía de activación.

Resumen

El coco es una fruta que puede aprovecharse completamente desde su parte líquida hasta su parte sólida, considerando la parte alimenticia y los residuos. La parte sólida puede utilizarse directamente como alimento, también puede ser procesado para su uso posterior. El secado es un proceso necesario para su conservación, por lo tanto se evaluó el secado por radiación para establecer la relación entre rapidez y temperatura del proceso. Se utilizaron las temperaturas de 60, 80, 100 y 120 °C. El coco fue extraído, molido y homogenizado manualmente. Se utilizó un deshidratador con transmisión de calor por radiación en cuatro temperaturas de proceso. El contenido de humedad fue determinado por la pérdida de masa hasta obtener peso constante en una capa delgada de producto. Se determinó que durante secado, el contenido de humedad es exponencialmente decreciente y el modelo matemático de Midilli se ajustó adecuadamente con un coeficiente de determinación (R^2) mayor al 94 %. El efecto de la temperatura en la rapidez del proceso se ajustó con la ecuación de Arrhenius. Se determinó que la energía de activación del proceso de secado por radiación en coco fue de 60,7 kJ/mol. La relación matemática de la rapidez del secado es una doble exponencial que depende directamente de la temperatura y el tiempo de secado.

Keywords

Coconut dehydration; Radiation heat transfer; Thin layer drying; Activation energy.

Abstract

Coconut is a fruit that can be totally used, not only its liquid part but also its solid one, including the eatable section and its residues. The solid part can be used as food and also be processed for later use. Drying is a necessary process for its conservation, for that reason radiation drying was evaluated to establish the relationship between speed and temperature. The experiments were conducted at drying temperatures of 60, 80, 100 and 120°C. Coconut pulp was manually scraped, chopped and homogenized. A dehydrator with heat transfer by radiation was used to conduct the experiments. The moisture content of the samples was determined by mass loss to obtain a constant weight in a thin layer of product. It was determined that during the drying process the moisture content decreased exponentially and Midilli model was found to adjust adequately with a coefficient of determination (R^2) above 94%. The temperature dependence of the process was satisfactorily described by an Arrhenius type relationship. An activation energy equal to 60,7 kJ/mol was found over the temperature range investigated in the radiation drying process. The mathematical relation of the drying process is a double exponential that depends directly on the temperature and drying time.

Introducción

El cocotero (*Cocos nucifera L.*) es un árbol cultivado por sus múltiples usos pero principalmente por su valor nutricional y medicinal. La composición del fruto son el agua, el aceite y la copra o pulpa seca del coco, las cuales además de su contenido de nutrientes y microminerales esenciales para la salud poseen características antioxidantes, antiinflamatorias, antibacteriales

e inmunoestimulantes [1]. A pesar de que la extracción del aceite representa el subproducto de mayor importancia industrial del coco [2], el proceso de deshidratación constituye una parte integral de su procesamiento puesto que permite obtener productos con una humedad final del 3% requeridos para su incorporación como ingrediente en la elaboración de chocolates, helados y pastelería [3]. La pulpa prensada obtenida mediante la extracción de la leche de coco representa un problema en los procesos industriales por su gran volumen, pero mediante procesos de deshidratación es posible obtener de igual manera productos tipo harinas de alto valor nutricional [4]. A nivel industrial los procesos de deshidratación se llevan a cabo mediante el uso de aire caliente en túneles de secado, secadores rotatorios y secadores de lecho fluidizado [5]. Otros métodos utilizan el secado por microondas, la deshidratación osmótica y la liofilización [5]. Sumnu *et al* (2005) [6] determinaron que mediante el uso de radiación en conjunto con microondas es posible obtener productos con una humedad final mucho menor y con una capacidad de rehidratación mayor que la obtenida mediante métodos convencionales de secado con aire caliente. En coco la rehidratación es importante puesto que se utiliza en conjunto al tenderizado y el endulzado previo a su industrialización o comercialización [3]. A nivel semi-teórico, se establece que el secado de capa delgada es un método adecuado para determinar la cinética de secado de frutas y vegetales puesto que se incorporan procesos simultáneos de transferencia de calor y masa en un producto totalmente expuesto las condiciones de secado [7], donde los modelos de Newton, Lewis, Page, Henderson-Pabis y Midilli-kucuk establecen los coeficientes y variables del secado de capa delgada [8]. La energía de activación es necesaria para activar el fenómeno de difusión de la humedad en el producto estudiado [9]. Esta energía se obtiene mediante la ecuación de Arrhenius [10] y demuestra la dependencia de la temperatura durante el proceso [11]. La atención del presente estudio fue la determinación de la cinética del secado de capa delgada del coco por el método de radiación, para determinar el efecto de la temperatura en la rapidez del secado por medio de la energía de activación que caracteriza el proceso.

Materiales y métodos

Los frutos fueron obtenidos de un productor local situado en la región atlántica de Costa Rica. Su mesocarpo o carne fue extraído y molido con un procesador de alimentos tipo licuadora. El producto obtenido se prensó con una manta para eliminar su líquido residual, se empacó herméticamente en una bolsa plástica con cierre zip y se almacenó a temperatura 5°C durante 12 horas para homogeneizar de su humedad. Para determinar el contenido de humedad inicial se utilizaron 3 muestras de 5g deshidratadas mediante una balanza de radiación (400 Watt) A&D modelo MF-50 a una temperatura de 80°C, hasta alcanzar un contenido de humedad de equilibrio. Los experimentos se llevaron a cabo por triplicado con temperaturas de 60, 80, 100 y 120°C en el mismo equipo utilizado para la determinación del contenido de humedad inicial. Para determinar el modelo de ajuste del proceso de secado por radiación se registró automáticamente la pérdida de peso de las muestras en periodos de 10 segundos. Los datos de masa húmeda y masa seca en equilibrio fueron convertidos a unidades adimensionales de razón de humedad (MR) mediante la ecuación (1):

$$MR = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Donde X_i , X , X_e representan el contenido de humedad (g agua/g producto) en la condición inicial, en un tiempo específico y en la condición de equilibrio respectivamente. Se utilizaron dos modelos de regresión no lineal para determinar el mejor modelo matemático que se adecúa al

proceso de deshidratación mediante el uso de radiación. Dentro de estos, el modelo de Page (2) y el modelo de Midilli (3), donde k corresponde a la constante de velocidad de secado, t corresponde al tiempo (min) y las constantes (a , b y n) son propias de cada modelo.

$$MR = \exp(-k * t^n) \quad (2)$$

$$MR = a * \exp(-k * t^n) + b * t \quad (3)$$

El modelo de mejor ajuste fue seleccionado como aquel con mayor coeficiente de correlación (R^2) y menor error cuadrático medio (RMSE) (ecuación 4), donde MR_{pre} representa el contenido de humedad predicho, MR_{exp} el contenido de humedad obtenido y N el número de observaciones [12] [3].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (4)$$

La energía de activación se obtiene mediante la ecuación de Arrhenius (5):

$$k = b * \exp\left(\frac{-E_a}{R_g * T_K}\right) \quad (5)$$

Al evaluar la relación obtenida entre el logaritmo natural de la constante de velocidad y el inverso de la temperatura a la que se realiza el proceso se obtiene un comportamiento lineal definido por la ecuación (6), donde k es la constante de la velocidad de secado, m es la pendiente de la recta ($-E_a/R_g$), T es la temperatura de secado (K), b es el intercepto con el eje, E_a es la energía de activación (J/mol) y R_g la constante universal de los gases (8,3143 J/mol*K)

$$\ln k = m * \frac{1}{T} + b \quad (6)$$

Resultados y discusión

El contenido de humedad inicial del coco fue de 125,2 g agua/g materia seca, resultado del promedio de los valores obtenidos. Los tiempos requeridos para alcanzar un contenido de humedad final de 0,09 g agua/g materia seca fueron de 75, 38, 28 y 18 minutos para las temperaturas de 60, 80, 100 y 120°C. La temperatura tuvo un efecto significativo en el secado. A una mayor temperatura el tiempo de secado se redujo debido al incremento en la presión de vapor de humedad del coco, lo cual aumentó la remoción de humedad. Como es esperado, la disminución de la relación de humedad (MR) al inicio del proceso de secado es rápida y luego este proceso se da lentamente según se acerca el producto a su contenido de humedad de equilibrio (figura 1). El comportamiento inicial se presenta de manera más acelerada para las temperaturas más altas (80, 100 y 120°C). La condición final para estas tres temperaturas se alcanza con diferencias de 10 minutos entre una y otra. El proceso a 60°C tiene una duración de 75 minutos y según se observa en la figura 1 el comportamiento de disminución es más gradual y presentándose una diferencia de 37 minutos con respecto a la temperatura de 100°C.

Visualmente se determinó que a temperaturas bajas (60 y 80°C) el coco conserva su color blanco característico pero a la mayor temperatura (120°C) se presentan condiciones de tostado,

lo que indica que además de la pérdida de humedad se puede estar dando una transformación de su masa.

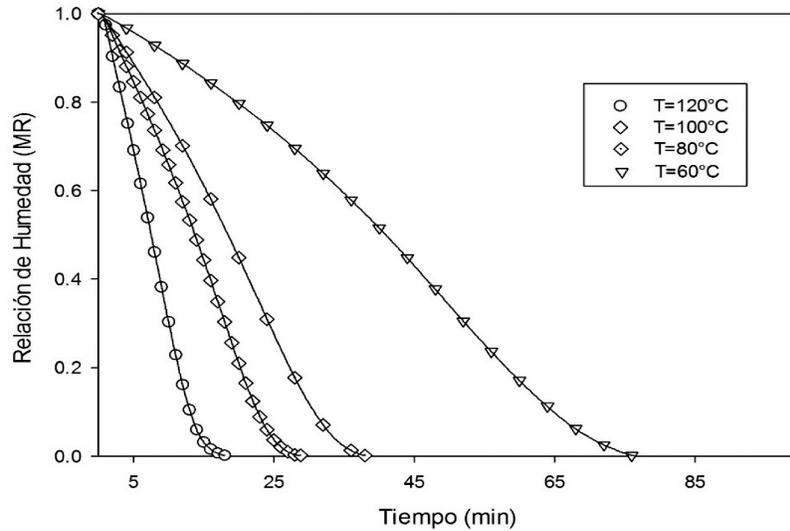


Figura 1. Efecto de la temperatura sobre la razón de humedad de coco rallado.

El cuadro 1 muestra los resultados de los coeficientes de regresión de los modelos matemáticos analizados y el resultado estadístico asociado a estos.

Cuadro 1. Coeficientes de regresión de dos modelos matemáticos de secado de coco por radiación

Modelo de secado	Temperatura (°C)	Constantes del modelo	R ²	RMSE
Midilli MR=a*exp(-kt)+bt	60	k= 0.0005, n=1.8758, a= 0.9671, b= -0.0028	0.9938	0.0251
	80	k= 0.0026, n=1.8776, a= 0.9579, b= -0.0017	0.9670	0.0602
	100	k=0.005, n= 1.8855, a=0.9667, b= -0.0016	0.9526	0.0733
	120	k= 0.0164, n= 1.8198, a= -0.0032, b= -0.9793	0.9976	0.0168
Page MR= exp (-kt)	60	k= 0.005, n= 1.9679	0.9816	0.0380
	80	k= 0.0036, n= 1.8390	0.9616	0.0649
	100	k= 0.0063, n= 1.8495	0.9494	0.0757
	120	k= 0.0167, n= 1.8724	0.9946	0.0250

Para ambos modelos el valor de R² fue superior a 0,94 indicando un ajuste satisfactorio. Los valores promedio asociados al coeficiente de regresión para los modelos Midilli y Page corresponden a 0,9777 y 0,9718. Los valores promedio asociados al error medio cuadrático corresponden a 0,0438 y 0,0509 respectivamente. De los resultados obtenidos se indica que el modelo de Midilli genera un mejor ajuste por el mayor valor de R² y por el menor valor de RMSE. Tanto para los modelos de Midilli y Page los coeficientes k y n tienden a un comportamiento

constante en el rango de temperaturas analizadas. Sin embargo, a partir de los 100°C los coeficientes a y b del modelo Midilli presentan un comportamiento decreciente.

La pendiente de la regresión lineal permite obtener una energía de activación de 60,7 kJ/mol con un coeficiente de regresión R² de 0,98.

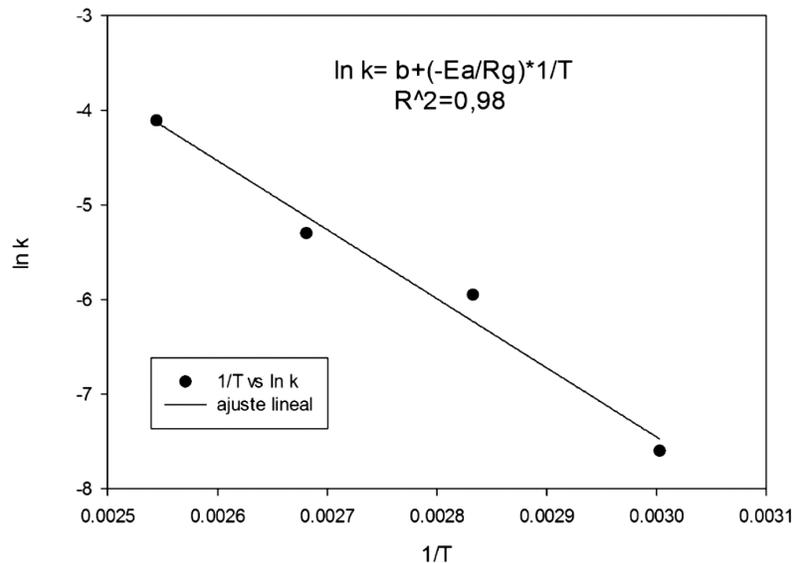


Figura 2. Regresión lineal entre el logaritmo natural de la velocidad de secado y el inverso de la temperatura absoluta de secado.

El cuadro 2 muestra los valores de la energía de activación del coco obtenidos con otros mecanismos de transmisión de calor para el secado. Se observa que el valor obtenido en el presente estudio es semejante al de las otras investigaciones, esta diferencia puede asociarse principalmente al equipo, la humedad inicial, la masa en estudio, el tamaño de partícula, el estado de madurez y hasta la variedad del fruto.

Cuadro 2. Energía de activación de coco en otros procesos de secado

Tratamiento	T (°C)	Dimensiones (mm)	Xi (b.s)	Ea (kJ/mol)	Referencia
Secado por radiación en capa delgada	60 a 120	2mm (diámetro medio)	125,2 ± 0,05	60,8	Trabajo actual
Secado osmótico y convección en capa delgada	50 a 70	6,13 x 10,12 x 30,65	2,33 kg/kg d.b	44,7	[13]
Secado osmótico y convección en capa delgada	50 a 70	4 x 4 x 8 y 2,5 x 2,5 x 5,0	(no indica)	81,1	[3]
Secado en lecho fluidizado en capa delgada	60 a 120	2,28mm (diámetro medio)	105 ± 25	25,9	[11]
Secado osmótico y convección en capa delgada	50 a 70	5 x 5 x 20 mm	125,359±0,003	19,7 a 25,2	[8]

Conclusiones

La temperatura del proceso afectó directamente la rapidez de secado. Ambos modelos matemáticos seleccionados se ajustaron al proceso con un coeficiente R2 mayor al 94%. Dentro de estos, el modelo de Midilli es considerado como el más preciso, reflejado por $R^2=0,97775$ y por sus valores bajos de la raíz cuadrática media. La energía de activación obtenida ($E_a= 60,7$ kJ/mol) se encuentra dentro de un rango de valores determinados en otras investigaciones. El método de radiación es adecuado para el secado del coco rallado a altas temperaturas en una capa delgada.

Referencias

- [1] M. DebMandal y S. Mandal. "Coconut (Cocos nucifera L.: Areaceae): In health promotion and disease prevention". *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 4(3), 2011, pp 241-247
- [2] C. Seow y C. Gwee. "Review. Coconut milk: chemistry and technology". *International Journal of Food Science and Technology*, 32, 1997, pp189-201
- [3] P. Madamba. "Thin layer drying models for osmotically predried young coconut". *Drying Technology*, 21(9), 2003, pp 1759-1780.
- [4] S. Jena y H. Das. "Modelling for vacuum drying characteristics of coconut presscake". *Journal of Food Engineering*, 79, 2007, pp 91-99
- [5] A. Casp y J. Abril, J. (2003). "Secado" en *Procesos de conservación de alimentos*. 2 edición. España: Editorial Mundiprensa.
- [6] G. Sumnu *et al.* "Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens". *LWT – Food Science and Technology*, 38(5), 2005, pp 549-553
- [7] D. Onwude *et al.* "Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 2016, pp 599-618
- [8] G. Kamalanathan y R. Meyyappan. "Thin layer drying kinetics of osmotic treated coconut slices by using sugar solution". *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6(3), 2015, pp 1286-1299
- [9] D. Ndapeu *et al.* "Experimental study of the drying kinetics of the coconut shells (Nucifera) of Cameroon". *Materials Science and Applications*, 4(1), 2013, pp 822-830
- [10] L. Petrou *et al.* "The use of the Arrhenius equation in the study of deterioration and cooking of foods: Some scientific and pedagogic aspect". *Science-Technology-Environment-Society (STES)*, 3, 2002, pp 87-97
- [11] T. Madhiyanon *et al.* "Models of fluidized bed drying for thin layer chopped coconut". *Applied Thermal Engineering*, 29, 2009, pp 2849-2854
- [12] R. Assawarachan. "Drying kinetics of coconut residue in fluidized bed". *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 2(2), 2013, pp 263-266
- [13] W. Da Silva *et al.* "Osmotic dehydration and convective drying of coconut slices: Experimental determination and description using one-dimensional diffusion model". *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13, 2014, pp 162-168.